

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA KONSTRUKCÍ

**PŘEPOČET SILNIČNÍHO MOSTU S OCELOVOU
ORTOTROPNÍ MOSTOVKOU**

**RE-DESIGN OF THE ORTHOTROPIC DECK ROAD
BRIDGE**

STUDENT:

MGR. BC. JANA HOHNOVÁ

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

ING. MIROSLAV ROSMANIT, PH. D.

OSTRAVA 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Mgr. Bc. Jana Szurdiová**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: **Přepoččet silničního mostu s ocelovou ortotropní mostovkou.
Re-design of The Orthotropic Deck Road Bridge.**

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce vypracujte:

1. Ocelové silniční mosty s ortotropní mostovkou – teoretický základ, příklady z praxe, výhody, nevýhody, specifika návrhu těchto konstrukcí.
2. Zpracování základní dokumentace stávajícího stavu mostu dle daných podkladů – místní šetření, korozní úbytky, původní projektová dokumentace.
3. Návrh hlavních nosných částí mostu zjednodušeným (ručním) výpočtem.
4. Numerický MKP model mostu, posouzení hlavních nosných částí mostu.
5. Ověření únosnosti vybraných detailů mostu, vytipování možných problematických míst v souvislosti se současným namáháním konstrukce s přihlédnutím na známé korozní oslabení konstrukce.
6. Zhodnocení současného stavu konstrukce z hlediska únosnosti a použitelnosti, návrh vhodných oprav.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1992-2 - Eurokód 2: Navrhování železobetonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady
- [2] ČSN EN 1993-2 - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty
- [3] ČSN EN 1994-2 - Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 2: Obecná pravidla a pravidla pro mosty
- [4] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí. Praha : ČNI, 2004.
- [5] ČSN EN 1991-1-X: Zatížení konstrukcí (příslušné části). Praha : ČNI.
- [6] ČSN EN 1993-1-1: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Praha : ČNI, 2006.
- [7] ČSN EN 1993-1-8: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků. Praha : ČNI, 2006.
- [8] "Structural Steel Designer's Handbook" by R. L. Brockenbrough, P.E. & F. S. Merritt, P.E. 3rd edition, Section 14: Arch Bridges by Arthur W. Hedgren, Jr., P.E., Sr. Vice President, HDR Engineering, Inc., Pittsburgh, PA., Published by McGraw-Hill, Inc.
- [9] Sukhen Chatterjee: The Design of Modern Steel Bridges, Second edition, Oxford 2003, ISBN 0-632-05511-1
- [10] Odborné časopisy – Konstrukce, Stavitel, Structural Engineering, Stahlbau
- [11] Internet

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 1. 12. 2014

.....
podpis

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, же Высoкá школа ба́ньскá – Техни́кá универзита Острава (да́ле jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было сjeднáно, же с VŠB-TUO, в пpипаде́ зájму з její strany, узавpу лицен́ный сmlouvu с оупpáвнéнім у́жит діло в rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было сjeднáно, же у́жит své діло – дипломову́ пpáци nebo poskytnout licenci k jejímu vyúžití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je оупpáвнéна в takovém пpипаде́ ode mne požadovat пpимépéный пpіспéвек на úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, же оdevздáнім své пpáце souhlasím se зvepеjнéнім své пpáце podle zákona č. 111/1998 Sb., о vysokých školách a о змéне a доплне́ні да́лших за́конов (закон о vysokých školách), в зне́ні позде́jších пpедпису́, без оhledu на výsledek její обhаjобы.

V Ostravě dne 1. 12. 2014

.....
podpis

Anotace

Předmětem diplomové práce je přepoččet silničního mostu s ortotropní mostovkou ve Frýdku-Místku, který převádí silnici II/473 přes řeku Ostravici a přes železniční trať.

V práci jsou popsány mosty s ortotropní mostovkou a jsou uvedena specifika jejich návrhu. Práce se zabývá výpočtem zatížení, vnitřních sil a napětí v konstrukci. Výsledky získané zjednodušeným (ručním) výpočtem jsou porovnány s numerickým modelem. Posouzení hlavních nosných částí mostní konstrukce je provedeno dle platných Evropských norem.

Klíčová slova: silniční most, ortotropní mostovka, příčné a podélné výztuhy, deska, stěna, ochabnutí smykem, boulení, spolupůsobící šířka

Annotation

The main focus of the thesis is re-design of the orthotropic deck road bridge in Frýdek-Místek that converts the road III/473 across the Ostravice river and over the railway track.

The thesis describes the bridges with orthotropic deck and specifics of their design. The work deals with the load calculation, internal forces and stresses of the structure. Results obtained by simplified (manual) calculation are compared with the numerical model. Assessment of the main components of the bridge is done according to valid Eurocodes.

Key Words: road bridge, orthotropic deck, cross and longitudinal stiffeners, plate, web, shear lag, buckling, effective width

Obsah

Úvod	17
1 Teoretický základ	18
1.1 Konstrukce silničního mostu s ocelovou ortotropní mostovkou	18
1.2 Výhody a nevýhody	19
1.3 Příklady realizací mostů s ortotropní mostovkou	20
1.4 Výpočtové postupy mostů s deskovou mostovkou	22
1.4.1 Ochabnutí smykem širokých pásů	23
1.4.2 Účinky boulení stěn	25
2 Charakteristika mostu	28
2.1 Stručný popis mostu	30
2.2 Ložiska	30
2.3 Dilatační závěry	30
2.4 Odvodnění	32
2.5 Materiál	32
2.6 Stávající stav	33
3 Zatížení	35
3.1 Stálé zatížení	35
3.2 Proměnná zatížení – zatížení dopravou	35
3.2.1 Model zatížení 1 - LM1	36
3.2.2 Model zatížení 2 - LM2	37
3.2.3 Model zatížení 3 - LM3	38
3.2.4 Model zatížení 4 - LM4	39
3.2.5 Brzdné a rozjezdové síly	39
3.2.6 Odstředivé a jiné příčné síly	39
3.2.7 Sestavy zatížení	39
4 Zjednodušený (ruční) výpočet	41
4.1 Hlavní nosný systém	42
4.1.1 Zatížení a vnitřní síly	42

4.2	Hlavní nosník – v krajním poli	50
4.2.1	Průřezové charakteristiky	50
4.2.2	Ochabnutí smykem	51
4.2.3	Boulení tlačného pásu	52
4.2.4	Boulení mezi hlavními nosníky	54
4.2.5	Boulení na konzole	57
4.2.6	Interakce ochabnutí smykem a boulení	60
4.2.7	Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu	60
4.2.8	Boulení stěny nosníku	60
4.2.9	Průřezové charakteristiky účinného průřezu	61
4.2.10	Napětí v posuzovaných místech od systému I	61
4.3	Hlavní nosník – ve středním poli	62
4.3.1	Průřezové charakteristiky	62
4.3.2	Ochabnutí smykem	63
4.3.3	Boulení	64
4.3.4	Interakce ochabnutí smykem a boulení	64
4.3.5	Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu	64
4.3.6	Boulení stěny nosníku	65
4.3.7	Průřezové charakteristiky účinného průřezu	65
4.3.8	Napětí v posuzovaných místech od systému I	66
4.4	Hlavní nosník – nad podporou	67
4.4.1	Průřezové charakteristiky	67
4.4.2	Ochabnutí smykem	68
4.4.3	Boulení	69
4.4.4	Interakce ochabnutí smykem a boulení	69
4.4.5	Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu	69
4.4.6	Boulení stěny nosníku	70
4.4.7	Průřezové charakteristiky účinného průřezu	70
4.4.8	Napětí v posuzovaných místech od systému I	71
4.5	Podélné výztuhy	72
4.5.1	Zatížení a vnitřní síly	72
4.6	Podélná výztuha – v poli	74
4.6.1	Ochabnutí smykem	74

4.6.2	Průřezové charakteristiky	74
4.6.3	Napětí od mostovky – mezi příčnými výztuhami	75
4.7	Podélná výztuha – nad podporou	76
4.7.1	Ochabnutí smykem	76
4.7.2	Průřezové charakteristiky	76
4.7.3	Napětí od mostovky – nad příčnou výztuhou	77
4.8	Příčné výztuhy	78
4.8.1	Zatížení a vnitřní síly	78
4.9	Příčná výztuha – v poli	81
4.9.1	Ochabnutí smykem	81
4.9.2	Průřezové charakteristiky	81
4.9.3	Napětí v příčném směru – mezi hlavními nosníky	82
4.10	Příčná výztuha – nad podporou	83
4.10.1	Ochabnutí smykem	83
4.10.2	Průřezové charakteristiky	83
4.10.3	Napětí v příčném směru – nad hlavním nosníkem	84
4.11	Posouzení příčných výztuh	85
4.11.1	Posouzení příčných výztuh na ohyb	85
4.11.2	Posouzení příčných výztuh na smyk	85
4.12	Celkové posouzení	87
5	Posouzení detailu	91
5.1	Zatížení a vnitřní síly	91
5.2	Posouzení 1. kombinace	92
5.3	Posouzení 2. kombinace	92
6	Numerický model mostu	94
6.1	Geometrie	94
6.2	Okrajové podmínky	95
6.2.1	Klouby	95
6.3	Síť	97
6.4	Zatížení	99
6.5	Výsledky	104

6.6 Srovnání se zjednodušeným výpočtem	108
Závěr	109
Použitá literatura	110
Seznam příloh	112

Seznam použitého značení

A_c	plná průřezová plocha	[m ²]
$A_{c,eff}$	účinná plocha tlačené pásnice v důsledku boulení	[m ²]
$A_{c,eff,loc}$	účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů v tlačené zóně	[m ²]
A_{eff}	účinné plocha průřezu	[m ²]
A_p	plná plocha stěny	[m ²]
A_{sl}	plocha plného průřezu výztuhy	[m ²]
$A_{sl,eff}$	součet účinných průřezů všech podélných výztuh umístěných v tlačené zóně	[m ²]
D_x	tuhost podélných výztuh	
D_y	tuhost příčných výztuh	
E	modul pružnosti	[MPa]
H	tuhost v kroucení mostovky	
I_{eff}	účinný moment setrvačnosti průřezu	[m ⁴]
I_i	moment setrvačnosti i -té části průřezu	[m ⁴]
I_p	moment setrvačnosti stěny pro ohyb	[m ⁴]
I_{sl}	moment setrvačnosti plného průřezu výztuhy	[m ⁴]
I_w	moment setrvačnosti příslušející stojině	[m ⁴]
L_1	délka 1. pole mostu	[m]
L_2	délka 2. pole mostu	[m]
L_e	délka mezi body s nulovým momentem	[m]
L_w	délka svaru	[mm]
M_{Ed}	návrhový ohybový moment	[kNm]
M_w	ohybový moment příslušející stojině	[kNm]
Q_{ak}	charakteristická hodnota nápravové síly (LM2)	[kN]
$Q_{i,k}$	char. hodnota nápravové síly (LM1) v i -tém pruhu	[kN]
Q_{lk}	char. hodnota podélných sil	[kN]
Q_{tk}	char. hodnota příčných nebo odstředivých sil	[kN]
TS	dvojnáprava modelu zatížení 1	
UDL	rovnoměrné zatížení modelu zatížení 1	
$V_{b,Rd}$	návrhová únosnost ve smyku	[kN]

$V_{bw,Rd}$	příspěvek stojiny	[kN]
$V_{bf,Rd}$	příspěvek pásnic	[kN]
V_{Ed}	návrhová posouvající síla	[kN]
W_{eff}	účinný pružný průřezový modul	[m ³]
$W_{el,w}$	průřezový modul svaru příslušející stojině	[m ³]
a	délka stěny (vzdálenost příčných výztuh)	[m]
a_w	účinná tloušťka svaru	[mm]
b	šířka stěny (vzdálenost hlavních nosníků)	[m]
\bar{b}	příslušná šířka	[mm]
b_0	přečnívající část pásnice nebo polovina šířky vnitřní části	[m]
$b_{c,loc}$	šířka tlačené části subpanelu	[mm]
b_{eff}	účinná šířka pro pružné smykové ochabnutí	[mm]
e	větší ze vzdáleností těžišť od neutrální osy	[mm]
f_u	mez pevnosti	[MPa]
f_y	mez kluzu	[MPa]
f_{yw}	mez kluzu stojiny	[MPa]
g_k	charakteristická hodnota stálého rovnoměrného zatížení	[kN/m ²]
h_w	výška stojiny	[mm]
i	poloměr setrvačnosti	[mm]
k_σ	součinitel kritického napětí	[–]
$k_{\sigma,p}$	součinitel kritického napětí podle teorie ortotropní stěny s „rozetřenými“ výztuhami	[–]
q_k	char. hodnota proměnného rovnoměrného zatížení	[kN/m ²]
$q_{i,k}$	char. hodnota rovnoměrného zatížení (LM1) v i -tém pruhu	[kN/m ²]
t	tloušťka stěny	[mm]
w_i	šířka zatěžovacího pruhu	[m]
z_d	vzdálenost dolních vláken od těžiště	[mm]
z_h	vzdálenost horních vláken od těžiště	[mm]
α	součinitel imperfekce	[–]
α_e	zvětšený součinitel imperfekce	[–]

$\alpha_{Q,i}, \alpha_{q,i}$	regulační součinitele v i -tém pruhu (LM1)	[–]
β	součinitel účinné šířky pro pružné smykové ochabnutí	[–]
β_Q	regulační součinitel modelu zatížení 2	[–]
β_w	korelační součinitel	[–]
$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}$	dílčí součinitele materiálu	[–]
$\bar{\lambda}_c$	poměrná prutová štíhlost	[–]
$\bar{\lambda}_p$	poměrná stěnová štíhlost	[–]
$\bar{\lambda}_w$	upravená štíhlost	[–]
ρ	součinitel boulení stěny	[–]
ρ_c	součinitel celkového boulení	[–]
ρ_{loc}	součinitel boulení pro subpanel	[–]
σ_1	větší krajní napětí	[MPa]
σ_2	menší krajní napětí	[MPa]
σ_{cr}	pružné kritické napětí	[MPa]
$\sigma_{cr,p}$	pružné kritické napětí stěny	[MPa]
$\sigma_{cr,c}$	pružné kritické prutové napětí	[MPa]
$\sigma_{i,I}$	normálové napětí v bodě i od systému I	[MPa]
$\sigma_{i,II}$	normálové napětí v bodě i od systému II	[MPa]
$\sigma_{i,pr}$	příčné normálové napětí v bodě i	[MPa]
σ_w	normálové napětí působící v rovině stojiny	[MPa]
σ_x	podélné normálové napětí	[MPa]
σ_z	příčné normálové napětí	[MPa]
σ_{\perp}	normálové napětí kolmé na účinný rozměr svaru	[MPa]
$\tau_{i,II}$	smykové napětí v bodě i od systému II	[MPa]
$\tau_{i,pr}$	smykové napětí v bodě i od příčného směru	[MPa]
τ_{\perp}	smykové napětí kolmé na osu svaru	[MPa]
τ_{\parallel}	smykové napětí rovnoběžné s osou svaru	[MPa]
χ_c	součinitel vzpěrnosti odpovídající prutu	[–]
χ_w	součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku	[–]
ψ	poměr napětí	[–]

Seznam obrázků

1	Příklady otevřených podélných výztuh	18
2	Příklady uzavřených podélných výztuh	19
3	Golden Gate Bridge v San Franciscu, zdroj: [7]	20
4	El Ferdan Bridge přes Suézský průplav, zdroj: [6]	21
5	Severinsbrücke v Kolíně nad Rýnem, zdroj: [8]	21
6	Znojemský viadukt, zdroj: [5]	22
7	Průběh napětí při smykovém ochabnutí, převzato z [13]	24
8	Lokalizace mostu, zdroj: [4]	28
9	Pohled na most směrem od Místku do Frýdku	28
10	Boční pohled na most	29
11	Pohled na konstrukci mostu	29
12	Schéma umístění ložisek: a) schéma reálného umístění, b) jiná varianta	31
13	Uložení na místecké opěře, kloub, dilatační závěr	31
14	Odvodnění	32
15	Vady a nedostatky	33
16	Roznos soustředěného zatížení vozovkou, převzato z [11]	36
17	Použití modelu zatížení LM1, převzato z [11]	37
18	Použití modelu zatížení LM2, převzato z [11]	38
19	Použití modelu zatížení LM3, převzato z [11]	38
20	Rozklad konstrukce ve výpočtu, převzato z [3]	41
21	Hlavní nosný systém	42
22	Statické schéma hlavního nosníku se stálým zatížením	43
23	Příčné rozmístění nápravových sil sestavy gr1a, příčinková čára	45
24	Příčné rozmístění rovnoměrných zatížení sestavy gr1a, příčinková čára	45
25	Rozmístění dvojnáprav sestavy gr1a v podélném směru pro získání maximálních hodnot: a) $M_{q,1}^+$, b) $M_{q,2}^+$, c) $M_{q,b}^-$, R_b , d) R_a , e) V_b	46
26	Rozmístění rovnoměrného zatížení sestavy gr1a v podélném směru pro získání maximálních hodnot: a) $M_{q,1}^+$, R_a , b) $M_{q,2}^+$, c) $M_{q,b}^-$, V_b , d) R_b	47
27	Průřez pravého hlavního nosníku - v krajním poli	50
28	Průřez mostovky mezi hlavními nosníky	54

29	Průřez mostovky na konzole	57
30	Průřez pravého hlavního nosníku - ve středním poli	62
31	Průřez pravého hlavního nosníku - nad podporou	67
32	Průřez podélné výztuhy mostovky	72
33	Statické schéma podélné výztuhy se stálým zatížením	72
34	Rozmístění zatížení sestavy gr1a na podélné výztuže pro získání maxi- málních hodnot: a) $M_{q,6}^+$, b) $M_{q,7,max}^-$, c) $V_{q,7,max}$	73
35	Efektivní průřez střední podélné výztuhy mostovky	75
36	Efektivní průřez krajní podélné výztuhy mostovky	76
37	Průřez příčné výztuhy mostovky	78
38	Statické schéma příčné výztuhy se stálým zatížením	79
39	Rozmístění zatížení sestavy gr1a na příčné výztuže pro získání maxi- málních hodnot: a) M^+ , b) $M_{b,1}^-$, c) $V_{b,2}$	80
40	Efektivní průřez příčné výztuhy mostovky v poli	82
41	Efektivní průřez příčné výztuhy mostovky nad podporou	84
42	Numerický model v softwaru Scia Engineer	94
43	Model mostu – pohled zespodu	94
44	Model čepu, klouby na tuhých prutech	95
45	Zadání testovaného kloubu – uložení, zatížení	96
46	Deformovaná konstrukce kloubu	96
47	Vnitřní síly na prutech reprezentujících čep	97
48	Síť	98
49	Zjemnění sítě v okolí výztuhy hlavního nosníku	98
50	Umístění sestavy zatížení gr1a v příčném směru	99
51	Umístění sestavy zatížení gr1a v podélném směru pro získání maxi- málních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	100
52	Umístění sestavy zatížení gr1b v příčném směru	100
53	Umístění sestavy zatížení gr1b v podélném směru pro získání maxi- málních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	100
54	Umístění sestavy zatížení gr4 v příčném směru	101
55	Umístění sestavy zatížení gr4 v podélném směru pro získání maxi- málních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	101
56	Umístění vozidel 900/150, 1800/200 v příčném směru	101

57	Umístění vozidla 900/150 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	102
58	Umístění vozidla 1800/200 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	102
59	Umístění vozidla 3000/240 v příčném směru	103
60	Umístění vozidla 3000/240 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli	103
61	Deformovaná konstrukce od vlastní tíhy	104
62	Deformovaná konstrukce od sestavy zatížení grla pro maximální napětí v 1. poli	104
63	Deformovaná konstrukce od sestavy zatížení grla pro maximální napětí v 2. poli	104
64	Napětí σ_E^+ od sestavy zatížení grla pro maximální napětí v 1. poli . .	105
65	Napětí σ_E^+ od sestavy zatížení grla pro maximální napětí v 2. poli . .	105
66	Napětí σ_y^- na řezu dolní pásnicí hlavního nosníku od sestav zatížení pro maximální napětí v 1. poli	106
67	Napětí σ_y^- na řezu dolní pásnicí hlavního nosníku od sestav zatížení pro maximální napětí v 2. poli	107
68	Napětí σ_E^+ na řezu plechem mostovky od sestavy zatížení grla pro maximální napětí v 2. poli	108

Seznam tabulek

1	Součinitel účinné šířky β , převzato z [13]	25
2	Srovnání tloušťek zkorodovaných prvků s tloušťkami dle projektu . .	34
3	Hodnoty regulačních součinitelů α pro ČR dle [11]	36
4	Charakteristické hodnoty zatížení pro LM1 dle [11]	37
5	Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od stálého zatížení, získané programem Scia Engineer 2013.1	43
6	Součinitelé α a charakteristické hodnoty zatížení pro LM1	44
7	Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a	44
8	Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od zatížení sestavy gr1a v podélném směru, získané programem Scia Engineer 2013.1 . .	48
9	Závislost charakteristických hodnot vnitřních sil a reakcí X na příč- ném roznášení	48
10	Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od zatížení sestavy gr1a v závislosti na příčném roznášení	49
11	Charakteristické hodnoty vnitřních sil na podélné výztuze	73
12	Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a na příčné výztuze	79
13	Charakteristické hodnoty vnitřních sil na příčné výztuze	80
14	Posouzení v krajním poli	88
15	Posouzení ve středním poli	89
16	Posouzení nad podporou	90
17	Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a pro MKP model	99

Úvod

Mosty jsou stavební díla, která jsou již po staletí stavěna pro překonávání nej-různějších překážek. Původně převáděly komunikaci přes potoky, řeky, jezera, rokle a hluboká údolí a později také přes umělé překážky vytvořené člověkem. Bývají často dominantním prvkem krajin i měst, čímž na sebe poutají pozornost široké veřejnosti.

Návrh mostů je specifickým oborem, musí se mu věnovat velká pozornost, aby nedošlo ke zřícení konstrukce s často tragickými následky. Mosty mají obvykle velká rozpětí a jsou zatíženy poměrně velkým pohyblivým zatížením s dynamic-kými účinky. Konstrukce musí sloužit stanovenému účelu, s určenou spolehlivostí musí odolávat zatížení a dalším působícím vlivům. Zároveň musí být vyrobena za co nejnižší pořizovací cenu.

Většina mostních konstrukcí je vyrobena z betonu, vzhledem k náročnosti výroby je jen malá část z oceli. Ocelové mosty se používají zejména pro velká rozpětí a pro složitější tvary konstrukcí.

Předmětem diplomové práce je přepoččet ocelové mostní konstrukce podle v sou-časnosti platných Evropských norem.

Celá práce je rozdělena do šesti částí. V první kapitole je popsána konstrukce silničního mostu s ortotropní mostovkou, výhody a nevýhody jejího použití a jsou zde vysvětleny výpočtové postupy. Samostatné části jsou věnovány ochabnutí smykem a boulení.

V druhé části je popsán posuzovaný most a jeho části.

Ve třetí kapitole je uvedeno zatížení působící na konstrukci. Je zde popsáno zatížení stálé i proměnné dopravou.

Čtvrtá kapitola se věnuje návrhu hlavních nosných částí mostu zjednodušeným výpočtem. Součástí je výpočet zatížení, vnitřních sil, efektivních průřezových cha-rakteristik, výpočet napětí a posouzení z hlediska únosnosti.

Pátá kapitola se věnuje posouzení vybraného detailu mostní konstrukce.

V poslední kapitole je popsán numerický model vytvořený v programu Scia En-gineer 2013.1. Jsou zde srovnány výsledky se zjednodušeným výpočtem.

V závěru je zhodnocen současný stav konstrukce a je proveden návrh vhodných oprav.

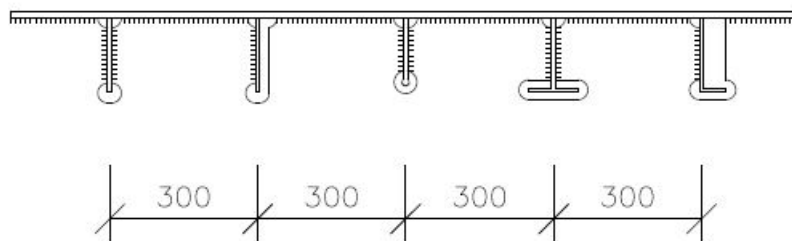
1 Teoretický základ

1.1 Konstrukce silničního mostu s ocelovou ortotropní mostovkou

Deskovou mostovku tvoří průběžný, minimálně 12 mm hrubý plech, vyztužený ve dvou na sebe navzájem kolmých směrech podélnými a příčnými přivařenými výztuhami. Takto zhotovená lehká mostovka se označuje jako ortotropní deska, neboť působení křížem vyztuženého plechu je podobné jako působení desky s různými tuhostními poměry ve dvou kolmých směrech, známé jako ortogonálně – anizotropní deska.

Desková mostovka je buď otevřená s jednostěnnými podélnými žebry nebo uzavřená s korýtkovými podélnými výztuhami.

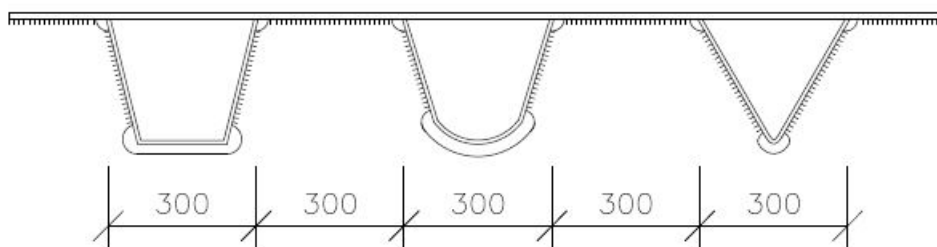
U otevřené mostovky je nejpoužívanější jednoduchý tvar podélné výztuhy z plechu. Únosnější je poloviční profil I nebo úhelník, ale průnik příčnou výztuhou je komplikovanější a jejich použití prodražuje výrobu. Podélná žebra jsou ve vzájemné vzdálenosti 300 mm (obr. 1). Příčné výztuhy jsou otevřené jednostěnné průřezy, mají zpravidla svařovaný průřez, jehož horní pásnici tvoří plech mostovky. Po délce mostu jsou v intervalu 1,5 m až 2,0 m.



Obrázek 1: Příklady otevřených podélných výztuh

Velmi účinné jsou uzavřené podélné výztuhy ve tvaru korýtka, které mají vyšší torzní tuhost a proto lépe roznášejí zatížení, vykazují menší průhyb. Výhodou také je, že vyžadují méně svařčeských prací. Tyto profily jsou za studena lisované. Často mívají tvar lichoběžníku, mohou být i zaoblené nebo trojúhelníkové (obr. 2). Šířka korýtek je 300 mm a mezera mezi nimi má tu stejnou velikost. Na stěnu příčné

výztuhy jsou připojené tupým svarem. Příčné výztuhy bývají u uzavřené mostovky ve větší vzdálenosti než u otevřené, od 2,0 m do 3,5m.



Obrázek 2: Příklady uzavřených podélných výztuh

Jednotlivé konstrukční elementy se spojují pomocí svarů. Podélná žebra jsou na stěny příčníků přivařena oboustrannými koutovými svary a na plech jednostrannými svary. Oboustrannými koutovými svary je připojen plech mostovky na stěny hlavních nosníků a na příčníky. Další styky plechu a žeber v podélném i příčném směru se provádí většinou tupými svary.

V místech svarů se koncentruje napětí, jsou to tzv. vruby. Může zde vzniknout únavový lom. Stykům se proto musí při návrhu i ve výrobě věnovat velká pozornost.

Na mnoha silničních mostech jsou plnostěnné hlavní nosníky nahrazené uzavřeným komorovým průřezem s velkou tuhostí v kroucení.

1.2 Výhody a nevýhody

Ortotropní mostovka patří mezi lehké mostovky. S rostoucím rozpětím mostu je podíl vlastní tíhy na namáhání konstrukce významný. Proto tato mostovka umožňuje ekonomicky přemostit i větší rozpětí. Úspěšně se uplatňuje i u lávek pro pěší a u pohyblivých mostů (zvedacích a sklápěcích). Výhodou malé hmotnosti deskové mostovky využívají provizorně montované mosty. Přednostmi jsou úspory na spodní stavbě, lehká přeprava a montáž mostu.

Výhodou také je snadná rekonstrukce. Ekonomicky výhodné jsou v poddolo- vaných oblastech, snadno se výškově i směrově rektifikují, zesilují a konstrukčně upravují v místech závěrných zdí a ložisek.

Konstrukční prvky mostovky mají více funkcí, což vede k efektivnějšímu využití

materiálu. Ocelová desková mostovka ohybovou tuhostí roznáší pohyblivé zatížení do hlavních nosníků a svou normálovou tuhostí se uplatňuje jako součást mostního trámu.

Stavební výška v porovnání s mostem klasické koncepce je menší. Při spodní mostovce se dosáhne vůbec nejmenší stavební výšky.

Nevýhodou je, že tato mostovka vyžaduje větší pracnost a nároky z hlediska kvality výroby. Celkové náklady na její zhotovení jsou proto vyšší než u klasického řešení.

1.3 Příklady realizací mostů s ortotropní mostovkou

Mnoho nejkrásnějších moderních mostních konstrukcí využívá ortotropní ocelové mostovky. Díky své malé hmotnosti a snadné rekonstrukci v mnoha případech nahradily původní těžké betonové mostovky. Vybrané příklady realizací zajímavých zahraničních mostů s ortotropní mostovkou jsou na obr. 3, 4 a 5. Příklad realizace takového mostu v České Republice je na obr. 6.



Obrázek 3: Golden Gate Bridge v San Franciscu, zdroj: [7]



Obrázek 4: El Ferdan Bridge přes Suézský průplav, zdroj: [6]



Obrázek 5: Severinsbrücke v Kolíně nad Rýnem, zdroj: [8]



Obrázek 6: Znojenský viadukt, zdroj: [5]

1.4 Výpočtové postupy mostů s deskovou mostovkou

Deska mostovky má více funkcí, přenáší svislé zatížení, je horním pásem hlavních nosníků, podélných i příčných výztuh a nahrazuje podélné a někdy i příčné ztužení mostu. Most s deskovou mostovkou se tím stane prostorovým útvarem složeným z plošných desko-stěnových forem. Přesnější výpočet lze udělat podle teorie tenkostěnných konstrukcí, např. metodou konečných prvků, metodou konečných pásů, metodou lomenic. Komplikacemi jsou problémy související s výrobou plošných prvků – počáteční imperfekce, reziduální napětí. Z tohoto důvodu se aplikují přibližné výpočty.

Ve zvoleném výpočtovém modelu je nutné vystihnout prostorové působení. Pro větší názornost a lehčí modelování je dobré rozložit prostorovou konstrukci na jednodušší desko-stěnové elementy vzájemně provázané.

Rozložíme prostorovou konstrukci na dva systémy. V systému I jsou sledovány účinky zatížení a vlivy na hlavní nosný systém. Systém II zahrnuje mostovku uloženou mezi stěnami hlavních nosníků. Pro každý systém a jemu příslušné zatížení se odděleně vyšetřují stabilitní jevy, ochabnutí smykem, vlivy příčného zatížení a další účinky (kroucení, roštové působení). Ochabnutí smykem a boulení jsou věnovány

samostatné podkapitoly této práce.

Musí se vyhledat rozhodující místa, která jsou nejvíce namáhaná odděleně stanovenými účinky. Jednotlivá napětí a deformace se potom superponují – jednoduché sčítání maximálních hodnot je zpravidla na bezpečné straně, ale vede k ne hospodárným návrhům.

V systému II mostovka svou deskovou tuhostí přenáší příčné zatížení do roviny hlavních nosníků. Působení desky lze vyjádřit pomocí Huberovy diferenciální rovnice

$$D_x \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot H \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y), \quad (1)$$

kde $D_x = \frac{EI_{pod}}{b_{pod}}$ je tuhost podélných výztuh a $D_y = \frac{EI_{pr}}{b_{pr}}$ je tuhost příčných výztuh. Tuhost v kroucení mostovky lze určit pomocí výrazu $H = \kappa \sqrt{D_x D_y}$, kde $\kappa = 0$ při úplném zanedbání tuhosti v kroucení, $\kappa = 0,3$ pro výztuhy otevřeného průřezu a $\kappa = 0,5$ pro podélné výztuhy uzavřeného průřezu a příčné výztuhy otevřeného průřezu.

Pomocí postupu zjednodušujícího Huberovu rovnici lze převést mostovku na nosníkový rošt. Hlavními nosíky roštu jsou příčné výztuhy a příčnými ztužidly jsou podélné výztuhy. Podélné výztuhy se uvažují jako spojitě nosníky podepřené příčnými výztuhami.

Také by se mělo uvážit namáhání plechu mostovky mezi podélnými výztuhami, pokud není splněno kritérium pro tloušťku plechu mostovky

$$t \geq a \sqrt[3]{\frac{125}{16} \cdot \frac{p}{E}}, \quad (2)$$

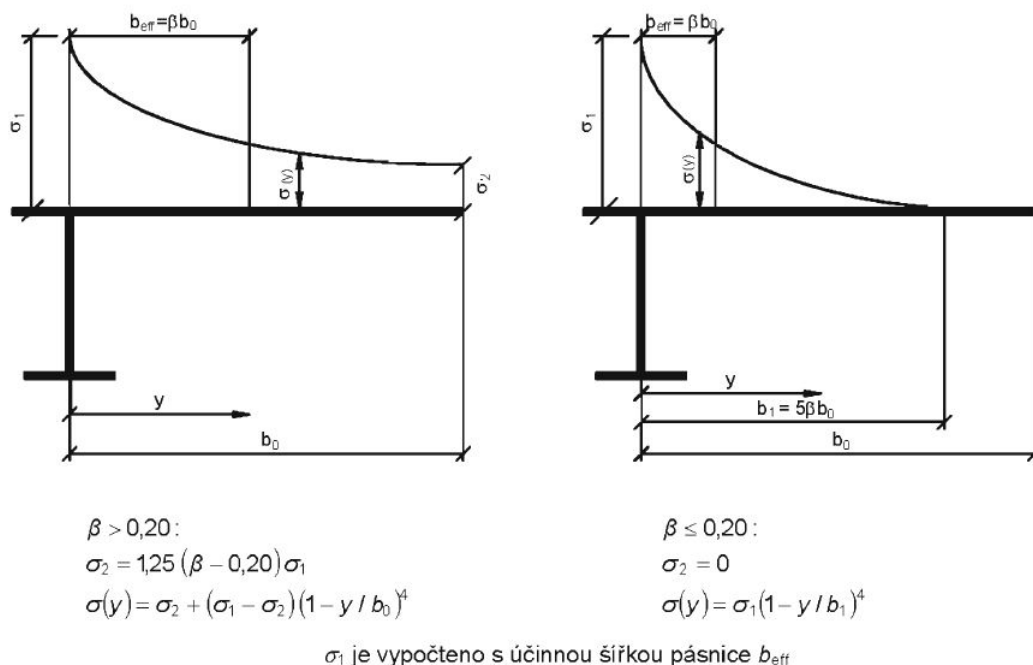
kde t je tloušťka plechu v mm, a je vzdálenost podélných výztuh v mm, p je zatížení v MNm^{-2} , E je modul pružnosti v MPa.

1.4.1 Ochabnutí smykem širokých pásů

Důsledkem ochabnutí smykem širokých pásů ohýbaných nosníků je snížená únosnost v tahu i v tlaku, dojde k nerovnoměrnému rozdělení napětí v širokých pásech, normálová tuhost vláken vzdálenějších od hlavního nosníku se neuplatňuje v plné míře (obr. 7). Účinky smykového ochabnutí lze zanedbat, když

$$b_0 < \frac{L_e}{50}, \quad (3)$$

kde b_0 je přechýlající část pásnice nebo polovina šířky vnitřní části a L_e je délka mezi body s nulovým momentem.



Obrázek 7: Průběh napětí při smykovém ochabnutí, převzato z [13]

Pro mezní stavy použitelnosti a únavy se účinek smykového ochabnutí určí pomocí účinné šířky, která je dána vztahem

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0, \quad (4)$$

kde β je součinitel účinné šířky, jehož hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

V mezním stavu únosnosti lze podle [13] účinky smykového ochabnutí stanovit jako pružnoplastické účinky smykového ochabnutí, zahrnující omezené plastické deformace, zavedením účinné plochy průřezu

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa \geq A_{c,eff} \cdot \beta, \quad (5)$$

kde $A_{c,eff}$ je účinná plocha tlačené pásnice v důsledku boulení.

κ	Místo posouzení	Hodnota β
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	kladné ohybové momenty	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	záporné ohybové momenty	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa} \right) + 1,6\kappa^2}$
$\kappa > 0,70$	kladné ohybové momenty	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	záporné ohybové momenty	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6\kappa}$
jakékoliv κ	koncová podpora	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa) \beta_1$, ale $\beta_0 < \beta_1$
jakékoliv κ	konzola	$\beta = \beta_2$ v podpoře a na konci
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$, kde $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}}$, přitom A_{sl} je plocha všech podélných výztuh v šířce b_0 .		

Tabulka 1: Součinitel účinné šířky β , převzato z [13]

1.4.2 Účinky boulení stěn

Únosnost širokých tlačných pásů příčně nezatížených je kromě ochabnutí smykem snižována také redistribucí napětí vlivem boulení, které je podporováno počátečními imperfekcemi. Při postupném zatěžování konstrukce vznikají v páse toky normálových sil, plech ztrácí svou schopnost je přijímat a přírůstky normálových sil jsou přebírané okrajovými zónami tlačného pásu. Vyztužené stěny mají pokrytí únosnost, zatímco nevyztužené stěny s volným okrajem mají jen zanedbatelnou pokrytí únosnost. Konstrukční řešení mostovky zpravidla vyžaduje vyztužení plechu.

Při posouzení průřezů lze únosnost stanovit pomocí průřezových parametrů pro

třídu průřezů 4 (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}).

U částí stěn bez podélných výztuh se účinná plocha tlačené zóny stanoví pomocí vztahu

$$A_{c,eff} = \rho A_c, \quad (6)$$

kde A_c je plná průřezová plocha a ρ je součinitel boulení stěny. Součinitel boulení ρ lze pro vnitřní tlačené části stanovit následovně:

$$\rho = 1,0 \quad pro \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}, \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad pro \quad \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (8)$$

pro přecházející tlačené části pak pomocí vztahů:

$$\rho = 1,0 \quad pro \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,748, \quad (9)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad pro \quad \bar{\lambda}_p > 0,748. \quad (10)$$

Poměrná štíhlost $\bar{\lambda}_p$ se stanoví podle

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}, \quad (11)$$

kde ψ je poměr napětí, \bar{b} je příslušná šířka, k_σ je součinitel kritického napětí uvedený v tabulkách 4.1 a 4.2 normy ČSN EN 1993-1-5, t je tloušťka, σ_{cr} je pružné kritické napětí a $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$. Kritické napětí σ_{cr} se určí podle rovnice

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma,p}\sigma_E, \quad (12)$$

kde $k_{\sigma,p}$ se určí dle normy ČSN EN 1993-1-5 (příloha A.1) a

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 Et^2}{12(1 - \nu^2)b^2} = 190000 \left(\frac{t}{\bar{b}}\right)^2. \quad (13)$$

U částí stěn s podélnými výztuhami se účinná plocha tlačené zóny stanoví pomocí vztahu

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t, \quad (14)$$

kde $A_{c,eff,loc}$ je účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů, které jsou v tlačené zóně. Výjimkou jsou účinné části podepřené sousední částí stěny o šířce $b_{edge,eff}$.

Plochu $A_{c,eff,loc}$ lze určit ze vztahu

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t, \quad (15)$$

kde $A_{sl,eff}$ je součet účinných průřezů všech podélných výztuh umístěných v tlačené zóně, \sum_c se vztahuje k šířce tlačené části vyztuženého panelu, $b_{c,loc}$ je šířka tlačené části každého subpanelu a ρ_{loc} je součinitel boulení podle rovnice pro každý subpanel.

Součinitel celkového boulení ρ_c se určí pomocí interpolace mezi součinitelem boulení stěn ρ a součinitelem vzpěrnosti prutů χ_c , který je přísnější, následovně:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c, \quad (16)$$

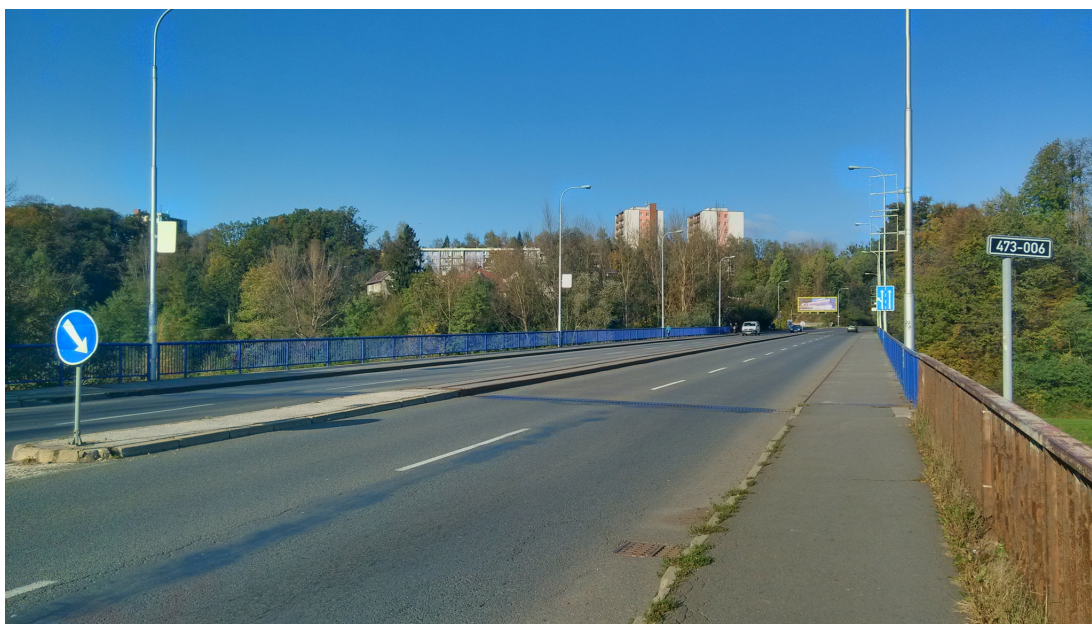
kde $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$, ale $0 \leq \xi \leq 1$, $\sigma_{cr,p}$ je pružné kritické napětí stěny, $\sigma_{cr,c}$ je pružné kritické prutové napětí.

2 Charakteristika mostu

K přepočítání byl vybrán silniční most ve Frýdku-Místku, který převádí silnici II/473 přes řeku Ostravici a přes železniční trať. Byl postaven v roce 1986 a nahradil nevyhovující most z roku 1902.



Obrázek 8: Lokalizace mostu, zdroj: [4]



Obrázek 9: Pohled na most směrem od Místku do Frýdku



Obrázek 10: Boční pohled na most



Obrázek 11: Pohled na konstrukci mostu

2.1 Stručný popis mostu

Most má tři pole, rozpětí obou krajních polí je 30,60 m a rozpětí středního pole je 48,45 m. Celkové rozpětí mostu je 109,65 m. Niveleta na mostě má podélný sklon 2,55%. Příčný sklon vozovky je 2%. Osa převáděné komunikace je v přímé.

V příčném řezu se most skládá ze dvou samostatných mostů oddělených podélnou spárou šířky 100 mm. Celková šířka mostu je 21,10 m. Oba mosty jsou tvořeny třemi hlavními nosníky. Všechny hlavní nosníky mají nesymetrický průřez I. Horní pás je součástí mostovkového plechu. Stěny hlavních nosníků jsou vyztuženy výztuhami tvaru T. Po vzdálenostech 5100 mm jsou umístěna příčná příhradová ztužidla.

Mostovkový plech je vyztužen podélnými korýtkovými výztuhami a příčníky nesymetrického profilu I. Korýtkové výztuhy jsou vždy navařeny na stěny příčníků, nad oběma podpěrami jsou protaženy skrz stěny příčníků.

Vzhledem k poddolovanému území byla navržena staticky určitá konstrukce. Jedná se o Gerberův nosník, vnitřní pole je zavěšeno na táhlech, která jsou osazena na čepech (klouby). Statický systém umožňuje eliminovat vlivy důlní činnosti. Konstrukce je navržena tak, aby byla snadno rektifikovatelná.

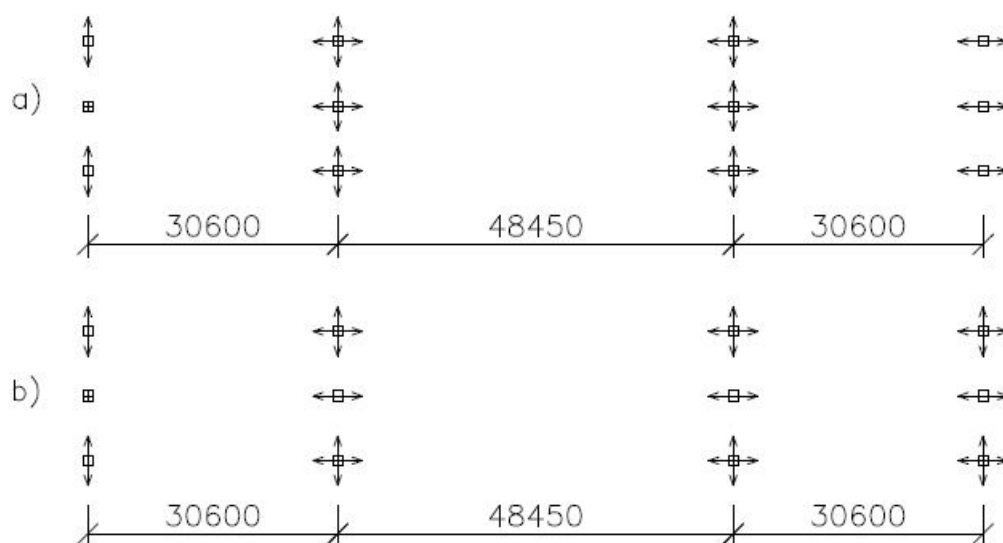
Zajímavostí je, že hlavní nosníky byly vyrobeny v místech kloubů jako průběžné, až při montáži byly vypáleny dolní pásnice a stojina hlavního nosníku. Tím se uvedly v činnost klouby. Ortotropní mostovka nad klouby je průběžná.

2.2 Ložiska

Ložiska jsou hrncová, kruhová. Oba samostatné mosty mají vždy jedno pevné ložisko pod prostředním hlavním nosníkem. Ostatní ložiska na opěrách jsou jednosměrně pohyblivá. Na podpěrách jsou všechna ložiska všesměrná. Schématické znázornění reálného umístění ložisek je na obrázku 12a. Jiná varianta umístění ložisek je na obrázku 12b, tato varianta by mohla být příznivější pro napjatost v konstrukci.

2.3 Dilatační závěry

Na obou stranách jsou prstové dilatační závěry, které jsou připevněny k mostu vysokopevnostními šrouby. Na chodnících a středním zvýšeném pruhu jsou dilatace z plechu tloušťky 12 mm.



Obrázek 12: Schéma umístění ložisek: a) schéma reálného umístění, b) jiná varianta



Obrázek 13: Uložení na místecké opěře, kloub, dilatační závěr

2.4 Odvodnění

Odvedení vody z mostu je provedeno pomocí spádovaného povrchu, voda stéká podél obrubníků a je odvedena pomocí mřížových odvodňovačů volně na terén. Prstové dilatace jsou odvodněny příčnými žlaby z plechu z oceli Atmofix.



Obrázek 14: Odvodnění

2.5 Materiál

Materiál na celý hlavní mostní objekt je navržen z oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi. Tím je zaručena povrchová ochrana hlavního mostního objektu kromě součástí z běžných konstrukčních ocelí (dilatace, podlaha revizní lávky, zábradlí...). Pro plechy byla použita ocel typu Atmofix 15 127.1 a pro úhelníky Atmofix 15 217.0. Hmotnost ocelové konstrukce je 925 000 kg.

Materiálové charakteristiky dle [12] – S355W:

Mez kluzu:	$f_y = 355 \text{ MPa}$ pro $t \leq 40 \text{ mm}$
	$f_y = 335 \text{ MPa}$ pro $t > 40 \text{ mm}$
Mez pevnosti:	$f_u = 490 \text{ MPa}$

2.6 Stávající stav

Informace o rozměrech stávající konstrukce jsou patrné z výkresové dokumentace, která je uvedena v příloze této práce.

Konstrukce mostu je v dobrém stavu. Při místním šetření bylo zjištěno několik nedostatků (obr. 15):

- zatékání vody u místecké opěře – nefunkční žlab pod mostními závěry,
- úbytek materiálu pod pevným ložiskem na místecké opěře,
- obnažená výztuž na místecké opěře,
- zkorodované čtvercové roury – vyústění odvodňovačů.



Obrázek 15: Vady a nedostatky

Korozní zkoušky na mostu byly provedeny výzkumnou skupinou – konstrukce staveb (VŠB-TUO). Dále uvedené údaje jsou čerpány ze zprávy [2].

Zkoumány byly vybrané typické plochy konstrukce přístupné z místecké opěry. Byly změřeny tloušťky korozních produktů a tloušťky prvků. Minimální naměřené hodnoty tlouštěk prvků a tloušťky prvků dle projektu jsou uvedeny v tabulce 2. První dvě položky jsou na plochách ovlivněných zatékáním, ostatní plochy zatékáním ovlivněny nejsou a jsou typické pro celou délku prvku. Největší korozní úbytky oproti projektu byly naměřeny na příčniku, který je ovlivněn zatékáním z nefunkčního odvodňovacího žlabu pod mostními závěry.

Vzhledem k malým korozním úbytkům není nutné vytvářet druhý model, který by byl tvořen prvky oslabenými korozi.

Zkoumaný povrch	Minimální změřená tloušťka [mm]	Tloušťka prvku dle projektu [mm]
Stěna příčniku – zatékání	15,64	16
Stěna krajního hl. nosníku – zatékání	16,18	16
Stěna krajního hl. nosníku	14,97	16
Vnitřní stěna hl.nosníku	16,28	16
Vnější povrch dolní pásnice hl. nosníku	34,97	35
Plech ortotropní mostovky	12,22	12

Tabulka 2: Srovnání tlouštěk zkorodovaných prvků s tloušťkami dle projektu

3 Zatížení

V této kapitole je popsáno zatížení působící na konstrukci dle [10, 11] a současně je uveden výpočet zatížení. Konstrukce je zatížena stálým a proměnným zatížením.

Pro jednotlivé prvky, které budou počítány zjednodušeným výpočtem, bude zatížení spočteno později.

3.1 Stálé zatížení

Podstatnou částí stálého zatížení je vlastní tíha nosné konstrukce. Celková hmotnost ocelové konstrukce včetně konstrukčních prvků je 925 000 kg. V numerickém MKP modelu byla vlastní tíha generována komerčním softwarem Scia Engineer 2013.1.

Zbývající částí stálého zatížení jsou živičné vrstvy.

Nenosné části ocelové konstrukce

$$g_{k,OK} \approx 0,68 \text{ kN/m}^2$$

Živičné vrstvy na vozovce

$$\text{tl.} = 80 \text{ mm}, \gamma = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$g_{k,V} = 0,08 \cdot 22 = 1,76 \text{ kN/m}^2$$

Živičné vrstvy na chodníku

$$\text{tl.} = 50 \text{ mm}, \gamma = 22 \text{ kN/m}^3$$

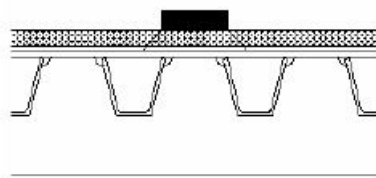
$$g_{k,CH} = 0,05 \cdot 22 = 1,10 \text{ kN/m}^2$$

3.2 Proměnná zatížení – zatížení dopravou

Od zatížení silniční dopravou vznikají svislé a vodorovné síly. Účinky svislého zatížení od dopravy jsou dle [11] reprezentovány modely zatížení (load model - LM). Tyto modely nepopisují skutečná zatížení, ale jejich účinek vyjadřuje účinek skutečné dopravy v evropských zemích v roce 2000. Dynamické zvětšení je zahrnuto v modelech zatížení.

Všechna zatížení mají být na vozovku umístěna tak, aby byl jejich účinek co nejnejpříznivější. Budou umístěna dle příčinkových čar.

Soustředěná zatížení související s modely zatížení LM1 a LM2 se uvažují jako rovnoměrná po celé dotykové ploše. Roznos zatížení je uvažován pod úhlem 45° až do střednicové plochy desky (obrázek 16), čímž je zvětšena dotyková plocha o 0,086 m na každou stranu.



Obrázek 16: Roznos soustředěného zatížení vozovkou, převzato z [11]

3.2.1 Model zatížení 1 - LM1

Tento model zatížení je složen ze soustředěného zatížení od dvojnápravy a rovnoměrného zatížení. Každá náprava dvojnápravy má dvě identická kola, jejichž kontaktní plochou je čtverec o straně 0,40 m. Každé kolo vyvozuje zatížení $0,5 \cdot \alpha_Q \cdot Q_k$. Rovnoměrné zatížení má tíhu $\alpha_q \cdot q_k$. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty regulačních součinitelů α_Q a α_q a v tabulce 4 jsou uvedeny charakteristické hodnoty zatížení $Q_{i,k}$ a $q_{i,k}$.

	α_{Q1}	α_{Q2}	α_{Q3}	α_{q1}	$\alpha_{qi}(i \geq 2)$	α_{qr}
silnice III. třídy předem stanovené příslušným úřadem, obslužné místní komunikace a obslužné komunikace	0,8	0,8	0,8	0,45	1,6	1,6
Ostatní komunikace	1,0	1,0	1,0	1,0	2,4	1,2

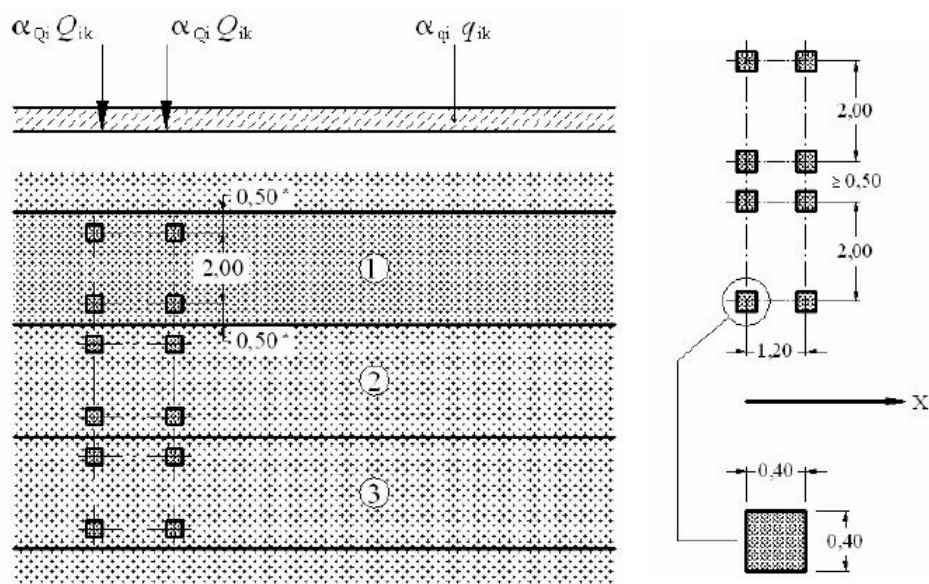
Tabulka 3: Hodnoty regulačních součinitelů α pro ČR dle [11]

Vozovka musí být rozdělena do zatěžovacích pruhů. Šířka vozovky na mostě je 7,5 m, dle [11] bude rozdělena na 2 zatěžovací pruhy šířky $w_{1,2} = 3$ m a šířka zbývající

Umístění	Nápravové síly Q_{ik} [kN]	Rovnoměrné zatížení q_{ik} [kN/m ²]
Pruh č. 1	300	9
Pruh č. 2	200	2,5
Pruh č. 3	100	2,5
Zbývajících plocha	0	2,5

Tabulka 4: Charakteristické hodnoty zatížení pro LM1 dle [11]

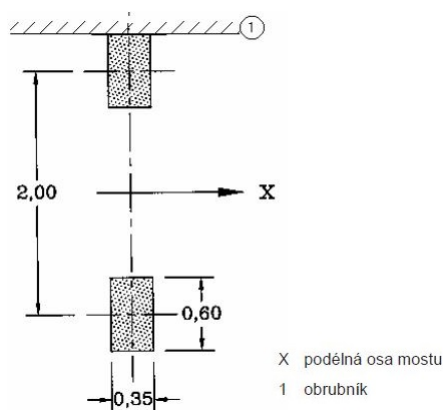
plochy bude 1,5 m. Regulační součinitelé jsou uvažovány pro silnici II. třídy. Model má být použit dle obrázku 17.



Obrázek 17: Použití modelu zatížení LM1, převzato z [11]

3.2.2 Model zatížení 2 - LM2

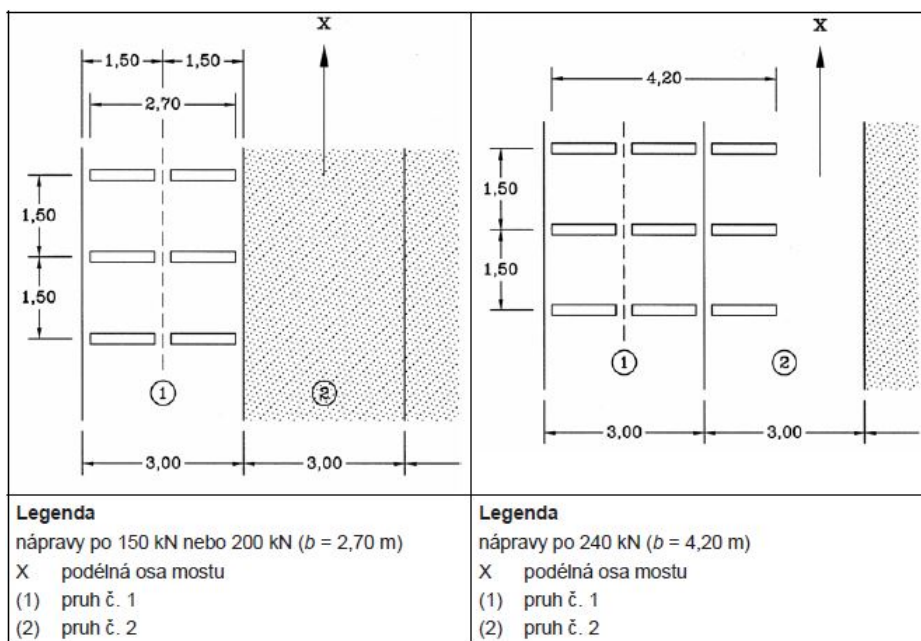
Model je tvořen nápravovou silou $\beta_Q Q_{ak}$, kde $\beta_Q = \alpha_{Q1} = 1,0$ a $Q_{ak} = 400$ kN. Dynamické účinky jsou zahrnuty. Tato náprava může být umístěna kdekoli na vozovce (obr. 18). Dotykovou plochou kola je obdélník o rozměrech 0,35 m × 0,60 m.



Obrázek 18: Použití modelu zatížení LM2, převzato z [11]

3.2.3 Model zatížení 3 - LM3

Tento model představuje zvláštní vozidla. Národní příloha normy [11] uvádí, že se mají použít vozidla 900/150 (6 náprav po 150 kN), 1800/200 (9 náprav po 200 kN) a 3000/240 (12 náprav po 240 kN a 1 náprava 120 kN). Dotykovou plochou kola je obdélník o rozměrech 0,15 m × 1,20 m. Použití tohoto modelu je uvedeno na obr. 19.



Obrázek 19: Použití modelu zatížení LM3, převzato z [11]

3.2.4 Model zatížení 4 - LM4

Tento model reprezentuje účinky zatížení davem lidí, uvažuje se jako rovnoměrné zatížení o velikosti 5 kN/m^2 umístěné kdekoli na mostě. Zahrnuje dynamické účinky.

3.2.5 Brzdné a rozjezdové síly

Jedná se o podélnou sílu velikosti $Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_iL = 360 + 2,7L$, přičemž $180\alpha_{Q1} \leq Q_{lk} \leq 900 [kN]$. Tato síla působí v úrovni povrchu vozovky.

Pro krajní pole má tato síla velikost $Q_{lk} = 360 + 2,7 \cdot 30,6 = 442,62 \text{ kN}$ a pro střední pole $Q_{lk} = 360 + 2,7 \cdot 48,45 = 490,82 \text{ kN}$. Síla se uvažuje tak, že působí v ose vozovky a je rovnoměrně rozdělena po zatěžovací délce.

Brzdná a rozjezdová síla mají stejnou velikost, ale opačný směr.

3.2.6 Odstředivé a jiné příčné síly

Jedná se o příčnou sílu, která působí v úrovni povrchu vozovky radiálně k ose vozovky. Její velikost závisí na poloměru osy vozovky ve vodorovné rovině.

Dále vznikají při šikmém brzdění a smyku boční síly, které se uvažují současně s podélnou brzdou nebo rozjezdovou silou. Její velikost je rovna $Q_{tk} = 0,25 \cdot Q_{lk}$. Pro krajní pole má tato síla velikost $Q_{tk} = 0,25 \cdot 442,62 = 110,66 \text{ kN}$ a pro střední pole $Q_{tk} = 0,25 \cdot 490,82 = 122,71 \text{ kN}$.

3.2.7 Sestavy zatížení

V normě [11] jsou stanoveny sestavy zatížení, které zahrnují současné působení zatěžovacích systémů LM1, LM2, LM3, LM4, vodorovných sil a zatížení pro chodníky. Tyto sestavy se vzájemně vylučují.

Sestava zatížení gr1a zahrnuje současné působení modelu zatížení LM1 a zatížení na chodníku, pro které je doporučena kombinační hodnota 3 kN/m^2 .

Sestava zatížení gr1b zahrnuje pouze působení modelu zatížení LM2.

Sestava zatížení gr2 zahrnuje současné působení částých hodnot modelu zatížení LM1, působení brzdných a rozjezdových sil a působení odstředivých a příčných sil.

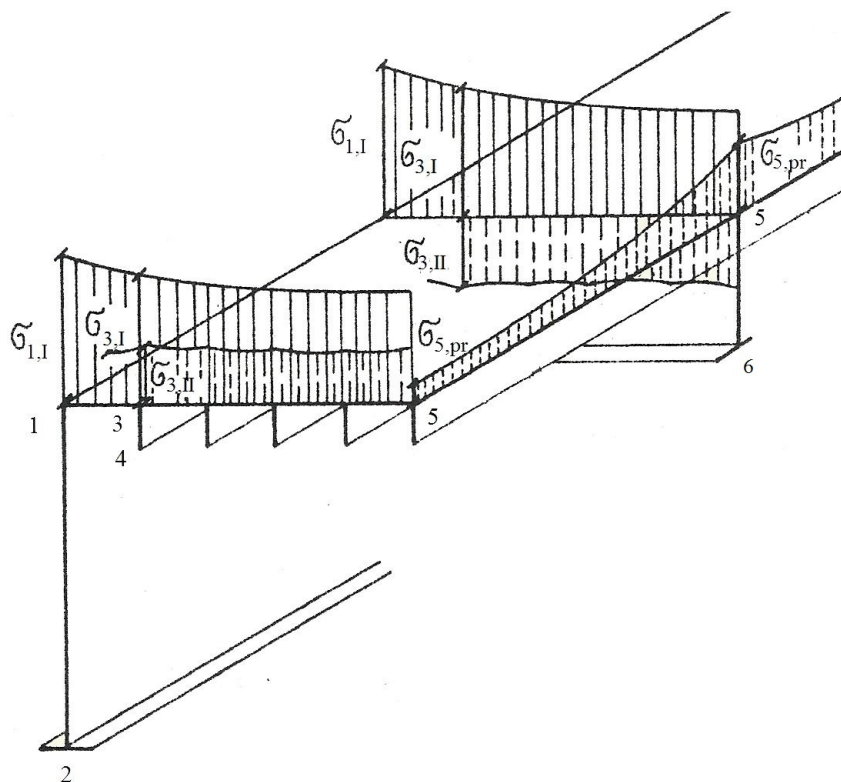
Sestava zatížení gr4 zahrnuje současné působení modelu zatížení LM4 a zatížení na chodníku, pro které je doporučena kombinační hodnota 3 kN/m^2 . Sestava zatížení

gr3 se při použití sestavy zatížení gr4 neuvažuje.

Sestava zatížení gr5 zahrnuje současné působení modelu zatížení LM1 a modelu zatížení LM3. Vozidla 900/150 a 1800/200 se umístí do zatěžovacího pruhu č. 1, v tomto pruhu bude pouze toto vozidlo, zbytek nosné konstrukce se zatíží modelem zatížení LM1. Vozidlo 3000/240 zasahuje navíc do pruhu č.2, jedná se o jediné vozidlo na mostě.

4 Zjednodušený (ruční) výpočet

Posouzen bude pravý hlavní nosník. Body, ve kterých bude konstrukce mostu posouzena, jsou znázorněny na obrázku 20.



Obrázek 20: Rozklad konstrukce ve výpočtu, převzato z [3]

Nejprve budou spočteny maximální vnitřní síly (ohybový moment) ve sledovaných průřezích hlavního nosníku (systém I). Výpočet by bylo možné provést přesněji, kdyby se uvažil roznos zatížení v mostovce a zatížení hlavních nosníků reakcemi příčných výztuh. Účinný průřez hlavního nosníku se stanoví s ohledem na oslabení smykem a boulení tlačného pásu dle [13]. Pro posouzení jsou rozhodující napětí $\sigma_{1,I}$ a $\sigma_{2,I}$ v bodech 1 a 2.

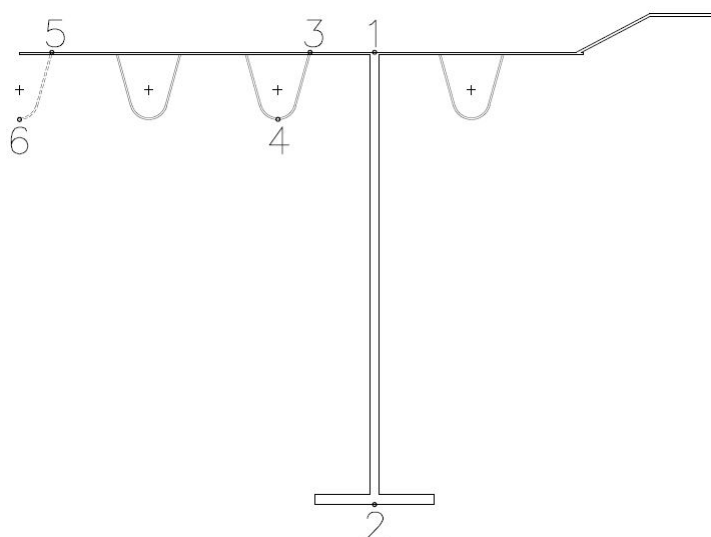
Poté se vypočítají maximální vnitřní síly z podmínek mostovky (systém II). Největší napětí v podélném směru vzniknou u výztuhy nejbližší k hlavnímu nosníku (předpokládá se přibližně stejné namáhání podélných výztuh). V bodu 3 vznikne od systému I napětí $\sigma_{3,I}$ a od systému II napětí $\sigma_{3,II}$, nejnepríznivější kombinace

těchto napětí vznikne v polovině vzdálenosti příčných výztuh. V bodu 4 vznikne od systému I napětí $\sigma_{4,I}$ a od systému II napětí $\sigma_{4,II}$, nejnepříznivější kombinace těchto napětí vznikne nad příčnou výztuhou.

Dále musí být v bodě 5 (resp. 6 pro posouzení nad podporou) splněna podmínka plasticity, ve kterém kromě napětí $\sigma_{5,I}$ (resp. $\sigma_{6,I}$) od systému I a $\sigma_{5,II}$ (resp. $\sigma_{6,II}$) od systému II vzniká ještě napětí $\sigma_{5,pr}$ (resp. $\sigma_{6,pr}$) v příčném směru. Posouzení v bodě 5 se provede na horním i dolním povrchu mostovky, neboť na horním povrchu je větší normálové napětí a nulové smykové napětí a na dolním povrchu je sice menší normálové napětí, ale vzniká zde smykové napětí.

Vliv ochabnutí smykem po šířce mostovky se projeví snížením normálového napětí, napětí od systému I v bodech 3, 4, 5 a 6 se určí pomocí obrázku 7.

4.1 Hlavní nosný systém



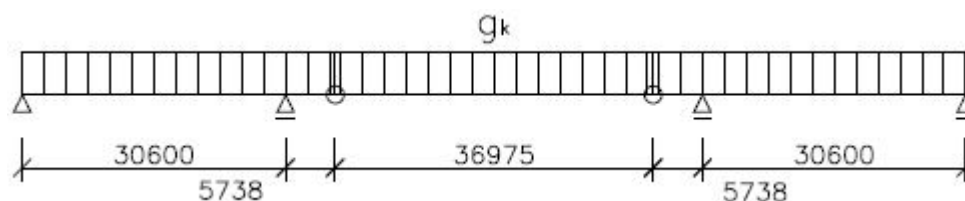
Obrázek 21: Hlavní nosný systém

4.1.1 Zatížení a vnitřní síly

V této části jsou uvedena zatížení působící na hlavní nosník. Jednotlivé zatěžovací stavy byly zadány do programu Scia Engineer 2013.1 a byly spočítány maximální vnitřní síly a reakce ve sledovaných bodech.

Stálé zatížení

vlastní tíha ocelové konstrukce	$\frac{9250}{111,39 \cdot 2} =$	41,52 kN/m
živičné vrstvy na vozovce	$0,08 \cdot 10,5 \cdot 22 =$	18,48 kN/m
CELKEM		60 kN/m
z toho na 1 nosník		<u>20 kN/m</u>
(zanedbána nesymetrie mostu)		



Obrázek 22: Statické schéma hlavního nosníku se stálým zatížením

Vnitřní síly a reakce	Stálé zatížení
$M_{g,1}^+$ [kNm]	1274,58
$M_{g,2}^+$ [kNm]	3417,88
$M_{g,b}^-$ [kNm]	2450,63
$R_{g,a}$ [kN]	225,91
$R_{g,b}$ [kN]	870,59
$V_{g,b}$ [kN]	484,50

Tabulka 5: Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od stálého zatížení, získané programem Scia Engineer 2013.1

Zatížení dopravou – sestava zatížení gr1a

Tato sestava zatížení je složena z charakteristických hodnot modelu LM1 a z kombinační hodnoty pro rovnoměrné zatížení na chodníku. Model zatížení LM1 je složen ze soustředěného zatížení od dvojnápravy TS a rovnoměrného zatížení UDL. Kombinační hodnota pro rovnoměrné zatížení na chodníku je rovna 3 kN/m^2 .

Na vozovce budou umístěny 2 zatěžovací pruhy šířky 3 m, šířka zbývajících ploch je 1,5 m. Vlevo je chodník šířky 2,3 m.

Umístění	Nápravové síly		Rovnoměrné zatížení	
	$\alpha_{Q,i}$	$Q_{ik} \text{ [kN]}$	$\alpha_{q,i}$	$q_{ik} \text{ [kN/m}^2\text{]}$
Pruh č. 1	1,0	300	1,0	9,0
Pruh č. 2	1,0	200	2,4	2,5
Zbývajících plocha	1,0	0	1,2	2,5

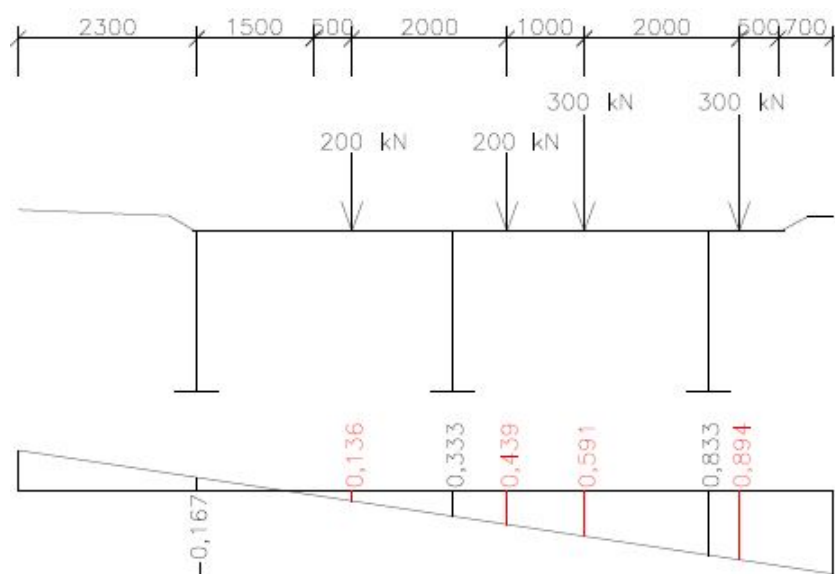
Tabulka 6: Součinitelé α a charakteristické hodnoty zatížení pro LM1

Umístění	Nápravové síly	Rovnoměrné zatížení
	$\alpha_{Q,i} \cdot Q_{ik} \text{ [kN]}$	$\alpha_{q,i} \cdot q_{ik} \text{ [kN/m}^2\text{]}$
Pruh č. 1	300	9,0
Pruh č. 2	200	6,0
Zbývajících plocha	0	3,0
Chodník	0	3,0

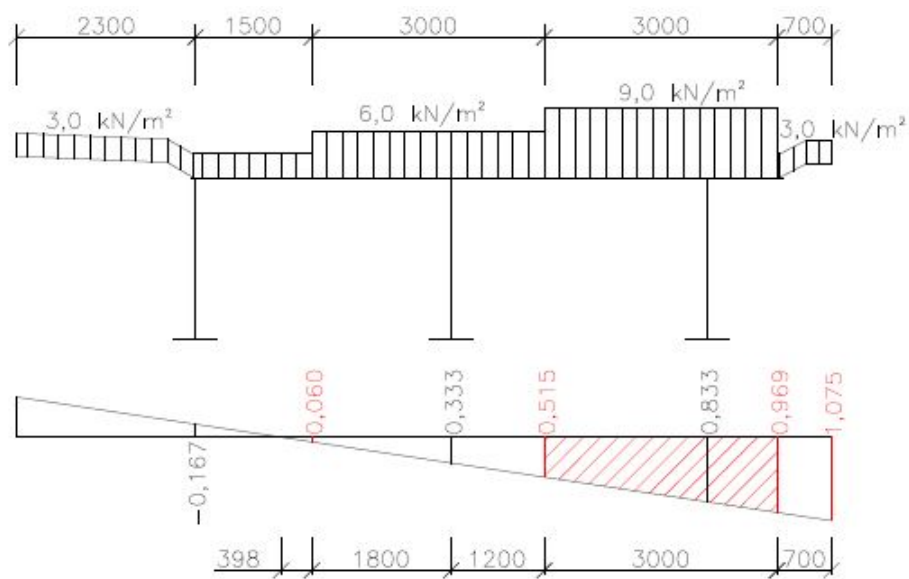
Tabulka 7: Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a

Všechna zatížení mají být na vozovku umístěna tak, aby byl jejich účinek co nejnejpříznivější. Všechna zatížení jsou umístěna dle příčinkových čar, předpokladem je nekonečně tuhé příčné ztužidlo. (Tento předpoklad není úplně správný, ale výpočet tuhosti příčného ztužidla je poměrně komplikovaný, což není předmětem této práce).

Příčné rozmístění všech zatížení sestavy gr1a na mostě

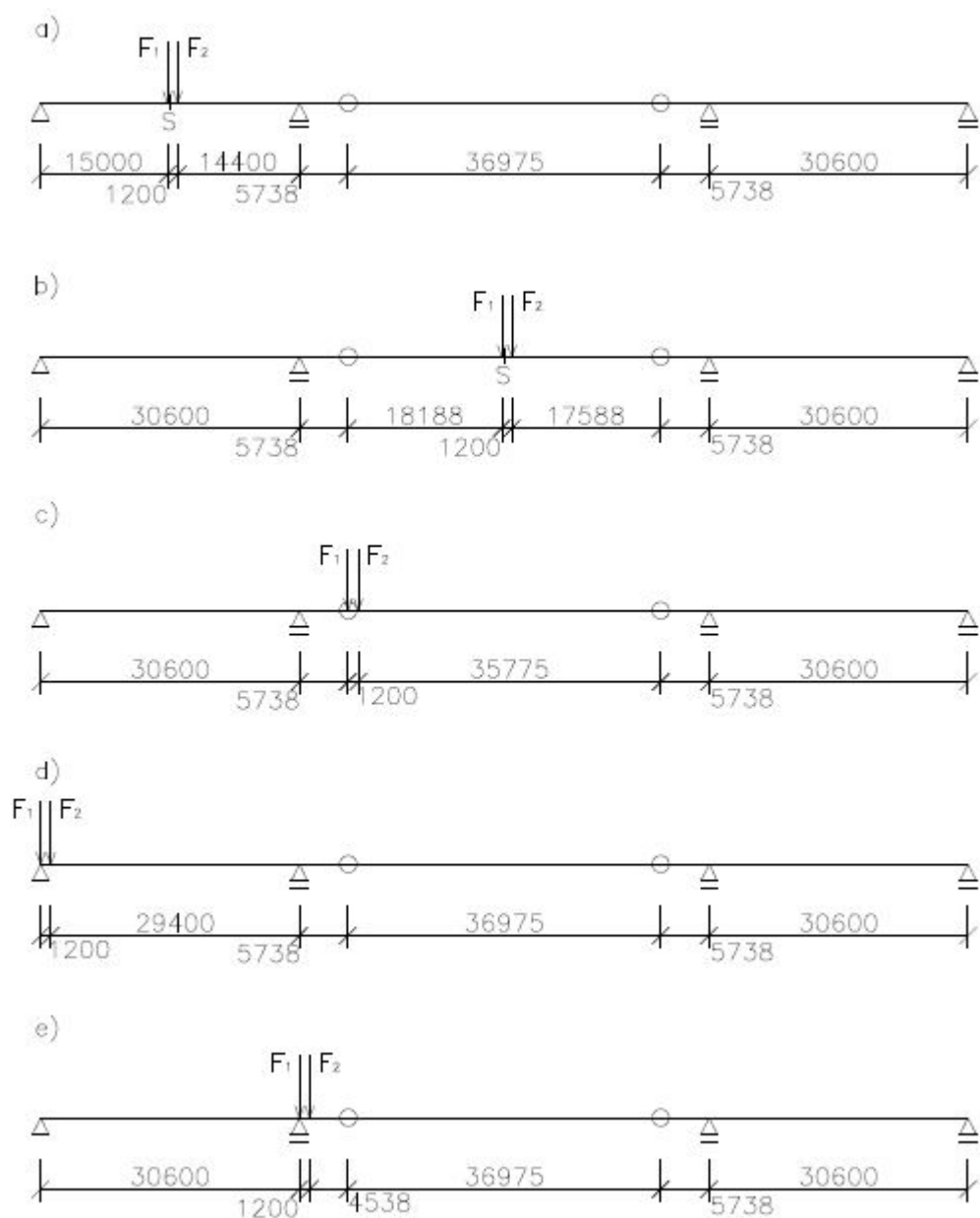


Obrázek 23: Příčné rozmístění nápravových sil sestavy gr1a, příčinková čára

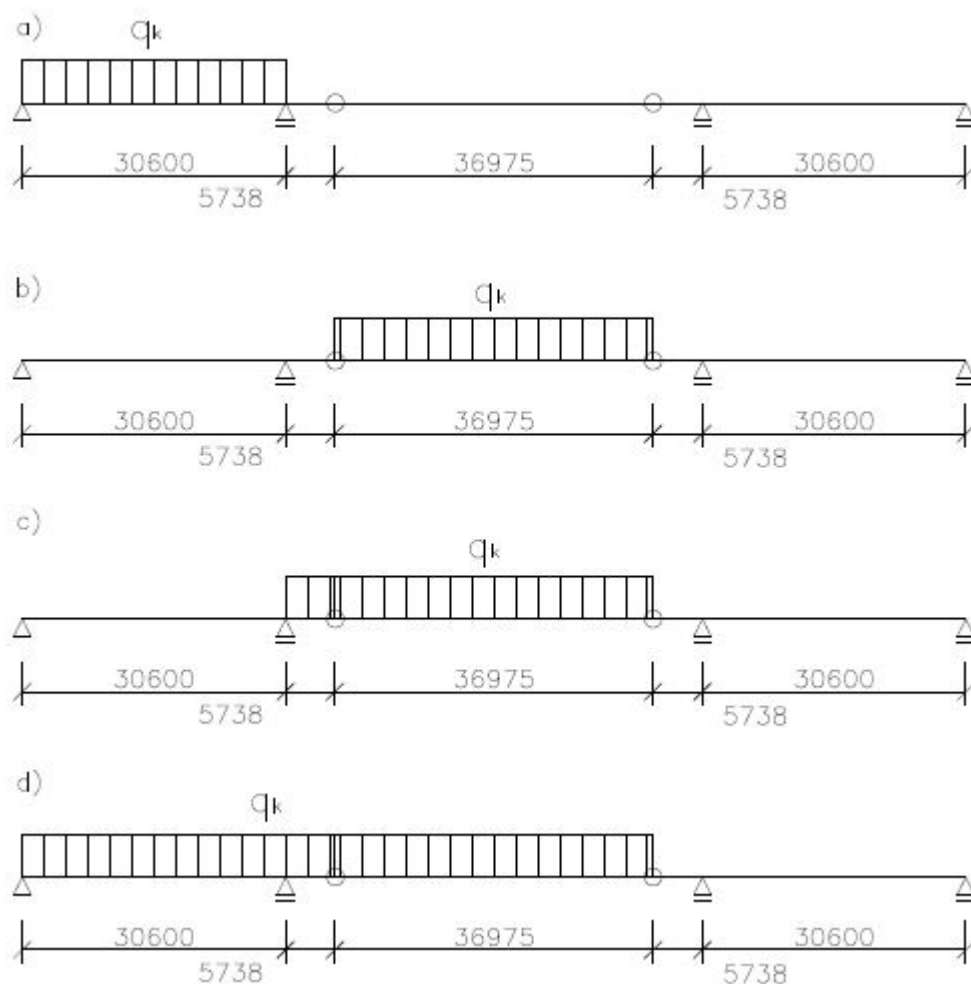


Obrázek 24: Příčné rozmístění rovnoměrných zatížení sestavy gr1a, příčinková čára

Rozmístění všech zatížení sestavy gr1a v podélném směru



Obrázek 25: Rozmístění dvojnáprav sestavy gr1a v podélném směru pro získání maximálních hodnot: a) $M_{q,1}^+$, b) $M_{q,2}^+$, c) $M_{q,b}^-$, R_b , d) R_a , e) V_b



Obrázek 26: Rozmístění rovnoměrného zatížení sestavy grla v podélném směru pro získání maximálních hodnot: a) $M_{q,1}^+$, R_a , b) $M_{q,2}^+$, c) $M_{q,b}^-$, V_b , d) R_b

Charakteristické vnitřní síly a reakce – sestava grla

Jednotlivé zatěžovací stavy byly zadány do programu Scia Engineer 2013.1. Nejprve byly spočítány maximální vnitřní síly a reakce v podélném směru, poté byly spočítány maximální vnitřní síly a reakce v závislosti na příčném roznášení.

Vnitřní síly a reakce X	Druh zatížení			
	TS	UDL – 1. pruh	UDL – 2. pruh	UDL – zbytek
$M_{q,1}^+$	7352,94 kNm	1053,41 kNm/m	702,27 kNm/m	351,13 kNm/m
$M_{q,2}^+$	8946,18 kNm	1538,04 kNm/m	1025,36 kNm/m	512,68 kNm/m
$M_{q,b}^-$	5644,4 kNm	1102,78 kNm/m	735,19 kNm/m	367,59 kNm/m
$R_{q,a}$	980,39 kN	137,7 kN/m	91,8 kN/m	45,9 kN/m
$R_{q,b}$	1168,23 kN	391,76 kN/m	261,18 kN/m	130,59 kN/m
$V_{q,b}$	983,77 kN	218,03 kN/m	145,35 kN/m	72,67 kN/m

Tabulka 8: Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od zatížení sestavy grla v podélném směru, získané programem Scia Engineer 2013.1

pro nápravové síly TS:	
v 1. pruhu:	$\frac{0,591 + 0,894}{2} \cdot X \cdot \frac{300}{500} = 0,4455 \cdot X$
v 2. pruhu:	$\frac{0,136 + 0,439}{2} \cdot X \cdot \frac{200}{500} = 0,115 \cdot X$
pro rovnoměrné zatížení UDL:	
v 1. pruhu:	$\frac{0,515 + 0,969}{2} \cdot X \cdot 3,0 = 2,226 \cdot X$
v 2. pruhu:	$\frac{0,060 + 0,515}{2} \cdot X \cdot 3,0 = 0,8625 \cdot X$
zbytek vlevo:	$\frac{0,060 + 0}{2} \cdot X \cdot 0,398 = 0,01194 \cdot X$
zbytek vpravo:	$\frac{0,969 + 1,075}{2} \cdot X \cdot 0,7 = 0,7154 \cdot X$

Tabulka 9: Závislost charakteristických hodnot vnitřních sil a reakcí X na příčném roznášení

Vnitřní síly a reakce X	Nápravové síly TS		Rovnoměrné zatížení UDL			
	1. pruh	2. pruh	1. pruh	2. pruh	zbytek 1	zbytek 2
$M_{q,1}^+$ [kNm]	3275,73	845,59	2344,89	605,71	4,19	251,20
$M_{q,2}^+$ [kNm]	3985,52	1028,81	3423,68	884,37	6,12	366,77
$M_{q,b}^-$ [kNm]	2514,58	649,11	2454,79	634,10	4,39	262,97
R_a [kN]	436,76	112,74	306,52	79,18	0,55	32,84
R_b [kN]	520,45	134,35	872,06	225,27	1,56	93,42
V_b [kN]	438,27	113,13	485,33	125,36	0,87	51,99

Tabulka 10: Charakteristické hodnoty vnitřních sil a reakcí od zatížení sestavy gr1a v závislosti na příčném roznášení

Návrhové vnitřní síly a reakce

Návrhové vnitřní síly a reakce budou vypočítány pomocí vztahu

$$X_{Ed} = \gamma_G \cdot X_G + \gamma_Q \cdot (\sum X_{Q,i} + \sum X_{q,i}),$$

kde X označuje charakteristickou hodnotu dané vnitřní síly nebo reakce, $\gamma_G = 1,35$ je součinitel stálých zatížení a $\gamma_Q = 1,35$ je součinitel proměnných zatížení dopravou.

$$M_{Ed,1}^+ = \gamma_G \cdot M_{g,1}^+ + \gamma_Q \cdot \sum M_{q,1,i}^+ = 1,35 \cdot 1274,58 + 1,35 \cdot (3275,73 + 845,59 + 2344,89 + 605,71 + 4,19 + 251,20) = \underline{11612,55 \text{ kNm}}$$

$$M_{Ed,2}^+ = \gamma_G \cdot M_{g,2}^+ + \gamma_Q \cdot \sum M_{q,2,i}^+ = 1,35 \cdot 3417,88 + 1,35 \cdot (3985,52 + 1028,81 + 3423,68 + 884,37 + 6,12 + 366,77) = \underline{17702,76 \text{ kNm}}$$

$$M_{Ed,b}^- = \gamma_G \cdot M_{g,b}^- + \gamma_Q \cdot \sum M_{q,b,i}^- = 1,35 \cdot 2450,63 + 1,35 \cdot (2514,58 + 649,11 + 2454,79 + 634,10 + 4,39 + 262,97) = \underline{12110,27 \text{ kNm}}$$

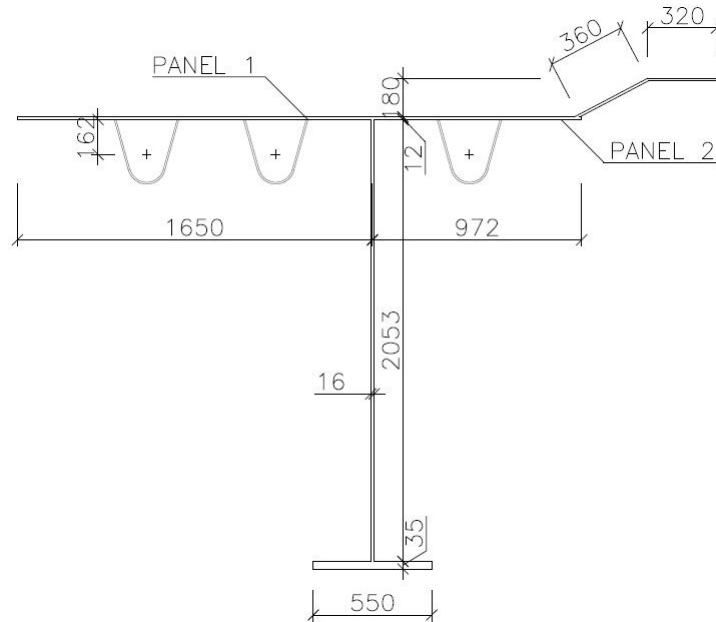
$$R_{d,a} = \gamma_G \cdot R_{g,a} + \gamma_Q \cdot \sum R_{q,a,i} = 1,35 \cdot 225,91 + 1,35 \cdot (436,76 + 112,74 + 306,52 + 79,18 + 0,55 + 32,84) = \underline{1612,58 \text{ kN}}$$

$$R_{d,b} = \gamma_G \cdot R_{g,b} + \gamma_Q \cdot \sum R_{q,b,i} = 1,35 \cdot 870,59 + 1,35 \cdot (520,45 + 134,35 + 872,06 + 225,27 + 1,56 + 93,42) = \underline{3668,88 \text{ kN}}$$

$$V_{Ed,b} = \gamma_G \cdot V_{g,b} + \gamma_Q \cdot \sum V_{q,b,i} = 1,35 \cdot 484,5 + 1,35 \cdot (438,27 + 113,13 + 485,33 + 125,36 + 0,87 + 51,99) = \underline{2294,27 \text{ kN}}$$

4.2 Hlavní nosník – v krajním poli

4.2.1 Průřezové charakteristiky



Obrázek 27: Průřez pravého hlavního nosníku - v krajním poli

$$A = 0,108522\text{m}^2$$

$$z_h = 0,7032\text{m}$$

$$z_d = 1,3968\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,035^3 + 0,55 \cdot 0,035 \cdot 1,3793^2 = 3,6625 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,053^3 + 0,016 \cdot 2,053 \cdot 0,3353^2 = 1,5231 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 2,622 \cdot 0,012^3 + 2,622 \cdot 0,012 \cdot 0,6972^2 = 1,5294 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,5 \cdot 10^{-8} + 0,36 \cdot 0,012 \cdot 0,7812^2 = 0,2636 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_5 = \frac{1}{12} \cdot 0,32 \cdot 0,012^3 + 0,32 \cdot 0,012 \cdot 0,8772^2 = 0,2955 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_6 = 3 \cdot (5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,5290^2) = 0,4701 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_y = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 7,74 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

4.2.2 Ochabnutí smykem

Panel 1

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 1,65\text{m}$$

$$L_1 = 30,60\text{m}$$

$$L_e = 0,85 \cdot L_1 = 0,85 \cdot 30,60 = 26,01\text{m}$$

$$b_0 = 1,65\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,52\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0112\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0112}{1,65 \cdot 0,012}} = 1,2513$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,2513 \cdot 1,65}{26,01} = 0,0794$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,0794^2} = \underline{0,9612}$$

Panel 2

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 0,97\text{m}$$

$$L_e = 0,85 \cdot L_1 = 0,85 \cdot 30,60 = 26,01\text{m}$$

$$b_0 = 0,97\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,52\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,008 + (0,36 + 0,32) \cdot 0,012 = 0,0138\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0138}{0,97 \cdot 0,012}} = 1,4772$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,4772 \cdot 0,97}{26,01} = 0,0551$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,0551^2} = \underline{0,9809}$$

4.2.3 Boulení tlačného pásu

Panel 1

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

pro vnitřní tlačné části, $\psi = 1$: $k_\sigma = 4$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t$$

$$A_{sl,eff} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0112 \text{m}^2$$

subpanel 1 – 4×

$$t = 0,012 \text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,3 \text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,3/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{4}} = 0,5410$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673 \Rightarrow \underline{\rho = 1,0} \dots \text{neboulí}$$

subpanel 2 – 1×

$$t = 0,012 \text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,45 \text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,45/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{4}} = 0,8115$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,8115 - 0,055(3 + 1)}{0,8115^2} = \underline{0,8982}$$

$$A_{c,eff,loc} = 0,0112 + 4 \cdot 1,0 \cdot 0,3 \cdot 0,012 + 0,8982 \cdot 0,012 \cdot 0,45 = \underline{0,030451 \text{m}^2}$$

Panel 2

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

pro přecházející tlačné části, $\psi = 1$: $k_\sigma = 0,43$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t$$

$$A_{sl,eff} = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0056\text{m}^2$$

subpanel 1 – 2×

$$t = 0,012\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,3\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,3/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,43}} = 1,6499$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,6499 - 0,188}{1,6499^2} = \underline{0,5370}$$

subpanel 2 – 1×

$$t = 0,012\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,372\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,372/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,43}} = 2,0459$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{2,0459 - 0,188}{2,0459^2} = \underline{0,4439}$$

subpanel 3 – 1×

$$t = 0,012\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,36\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,36/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,43}} = 1,9799$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,9799 - 0,188}{1,9799^2} = \underline{0,4571}$$

subpanel 4 – 1×

$$t = 0,012\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 0,32\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{0,32/0,012}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,43}} = 1,7599$$

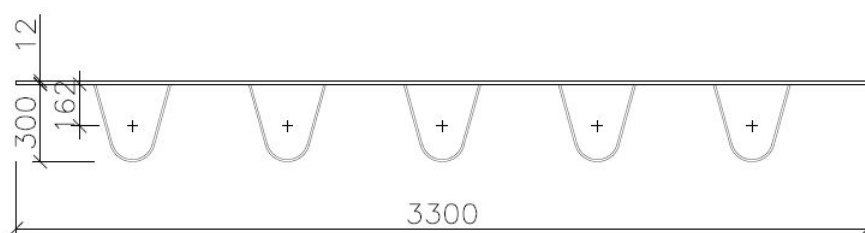
$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,7599 - 0,188}{1,7599^2} = \underline{0,5075}$$

$$A_{c,eff,loc} = 0,0056 + 2 \cdot 0,5370 \cdot 0,012 \cdot 0,3 + 0,4439 \cdot 0,372 \cdot 0,012 + 0,4571 \cdot 0,012 \cdot 0,36 + 0,5075 \cdot 0,012 \cdot 0,32 = \underline{0,015372\text{m}^2}$$

4.2.4 Boulení mezi hlavními nosníky

Průřezové charakteristiky



Obrázek 28: Průřez mostovky mezi hlavními nosníky

$$A = 3,3 \cdot 0,012 + 5 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0676\text{m}^2$$

$$z_h = \frac{3,3 \cdot 0,012 \cdot 0,006 + 5 \cdot 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,1742}{0,0676} = 0,0757\text{m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,312 - 0,0757 = 0,2363\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 3,3 \cdot 0,012^3 + 3,3 \cdot 0,012 \cdot 0,0697^2 = 1,93 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_2 = 5 \cdot (5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,0985^2) = 2,72 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_y = I_1 + I_2 = 1,93 \cdot 10^{-4} + 2,72 \cdot 10^{-4} = 4,65 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$a = 2,55\text{m} \quad \dots \text{ vzdálenost příčných výztuh}$$

$$b = 3,3\text{m} \quad \dots \text{ vzdálenost hlavních nosníků}$$

Stěnové chování

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.2 a přílohy A.1.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}}$$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{0,030451}{1,65 \cdot 0,012 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,008} = \underline{0,9823}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 190000 \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 190000 \left(\frac{0,012}{3,3} \right)^2 = 2,5124 \text{MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,0$$

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{2,55}{3,3} = 0,7727$$

$$\delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = \frac{5 \cdot 0,7 \cdot 0,008}{3,3 \cdot 0,012} = 0,7071$$

$$I_p = \frac{b \cdot t^3}{10,92} = \frac{3,3 \cdot 0,012^3}{10,92} = 5,22 \cdot 10^{-7} \text{m}^4$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = \frac{4,65 \cdot 10^{-4}}{5,22 \cdot 10^{-7}} = 890,08$$

$$\alpha = 0,7727 < \sqrt[4]{\gamma} = 5,462$$

$$\Rightarrow k_{\sigma,p} = \frac{2[(1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1]}{\alpha^2(\psi + 1)(1 + \delta)} = \frac{2[(1 + 0,7727^2)^2 + 890,08 - 1]}{0,7727^2(1,0 + 1)(1 + 0,7071)} = 874,74$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 874,74 \cdot 2,5124 = \underline{2197,7 \text{MPa}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,9823 \cdot 355}{2197,7}} = 0,3983$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673 \Rightarrow \underline{\rho = 1,0} \dots \text{neboulí}$$

Prutové chování

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.3 a ČSN EN 1993-1-1, 6.3.1.2.

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}$$

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4,65 \cdot 10^{-4}}{0,0676 \cdot 2,55^2} = 2191,6 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,9823 \cdot 355}{2191,6}} = 0,3989$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = \sqrt{\frac{4,65 \cdot 10^{-4}}{0,0676}} = 0,0829 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,34 \quad \dots (\text{křivka b}) \text{ pro výztuhy uzavřeného průřezu}$$

$$e = \max(e_1; e_2) = \max(0,0697; 0,0985) = 0,0985 \text{ m}$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,34 + \frac{0,09}{0,0829/0,0985} = 0,4469$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_e(\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2] = 0,5[1 + 0,4469(0,3989 - 0,2) + 0,3989^2] = 0,6240$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,6240 + \sqrt{0,6240^2 - 0,3989^2}} = \underline{0,9059}$$

Interakce mezi stěnovým a prutovým chováním

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.4.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c$$

$$\rho = 1,0$$

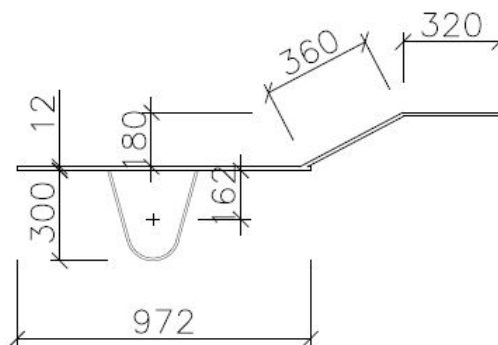
$$\chi_c = 0,9059$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{2197,7}{2191,6} - 1 = 0,0028$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,9059)0,0028(2 - 0,0028) + 0,9059 = \underline{0,9064}$$

4.2.5 Boulení na konzole

Průřezové charakteristiky



Obrázek 29: Průřez mostovky na konzole

$$A = (0,97 + 0,32 + 0,36) \cdot 0,012 + 0,7 \cdot 0,008 = 0,0254 \text{m}^2$$

$$z_h = \frac{0,97 \cdot 0,012 \cdot 0,186 + 0,32 \cdot 0,012 \cdot 0,006 + 0,36 \cdot 0,012 \cdot 0,096 + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,3542}{0,0254} = 0,1806 \text{m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,492 - 0,1806 = 0,3114 \text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,97 \cdot 0,012^3 + 0,97 \cdot 0,012 \cdot 0,0054^2 = 0,005 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,32 \cdot 0,012^3 + 0,32 \cdot 0,012 \cdot 0,1746^2 = 1,171 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$I_3 = 3,5 \cdot 10^{-8} + 0,36 \cdot 0,012 \cdot 0,0846^2 = 0,309 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$I_4 = 5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,1736^2 = 1,689 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$I_y = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$a = 2,55 \text{m} \quad \dots \text{ vzdálenost příčných výztuh}$$

$$b = 0,97 \text{m} \quad \dots \text{ délka konzoly}$$

Stěnové chování

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.2 a přílohy A.1.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}}$$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{0,015372}{0,0254} = \underline{0,6052}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190000 \left(\frac{0,012}{0,97}\right)^2 = 29,0785 \text{MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,0$$

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{2,55}{0,97} = 2,6289$$

$$\delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = \frac{0,0254 - 0,97 \cdot 0,012}{0,97 \cdot 0,012} = 1,1821$$

$$I_p = \frac{b \cdot t^3}{10,92} = \frac{0,97 \cdot 0,012^3}{10,92} = 1,53 \cdot 10^{-7} \text{m}^4$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = \frac{3,17 \cdot 10^{-4}}{1,53 \cdot 10^{-7}} = 2067,60$$

$$\alpha = 2,6289 < \sqrt[4]{\gamma} = 6,7432$$

$$\Rightarrow k_{\sigma,p} = \frac{2[(1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1]}{\alpha^2(\psi + 1)(1 + \delta)} = \frac{2[(1 + 2,6289^2)^2 + 2067,60 - 1]}{2,6289^2(1,0 + 1)(1 + 1,1821)} = 141,19$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 141,19 \cdot 29,0785 = \underline{4105,51 \text{MPa}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,6052 \cdot 355}{4105,51}} = 0,2288$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673 \Rightarrow \underline{\rho = 1,0} \dots \text{neboulí}$$

Prutové chování

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.3 a ČSN EN 1993-1-1, 6.3.1.2.

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}$$

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 3,17 \cdot 10^{-4}}{0,0254 \cdot 2,55^2} = 3982,57 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,6052 \cdot 355}{3982,57}} = 0,2323$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = \sqrt{\frac{3,17 \cdot 10^{-4}}{0,0254}} = 0,1118 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,34 \quad \dots (\text{křivka b}) \text{ pro výztuhy uzavřeného průřezu}$$

$$e = \max(e_1; e_2) = \max(0,0054; 0,0046) = 0,0054 \text{ m}$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,34 + \frac{0,09}{0,1118/0,0054} = 0,3444$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_e(\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2] = 0,5[1 + 0,3444(0,2323 - 0,2) + 0,2323^2] = 0,5325$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,5325 + \sqrt{0,5325^2 - 0,2323^2}} = \underline{0,9884}$$

Interakce mezi stěnovým a prutovým chováním

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.5.4.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c$$

$$\rho = 1,0$$

$$\chi_c = 0,9884$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{4105,51}{3982,57} - 1 = 0,0309$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,9884)0,0309(2 - 0,0309) + 0,9884 = \underline{0,9891}$$

4.2.6 Interakce ochabnutí smykem a boulení

Panel 1

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9064 \cdot 0,030451 = 0,027601\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,027601 \cdot 0,9612^{0,0794} = \underline{0,027515\text{m}^2}$$

Panel 2

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9891 \cdot 0,015372 = 0,015204\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,015204 \cdot 0,9809^{0,0551} = \underline{0,015188\text{m}^2}$$

4.2.7 Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu

$$A = 0,55 \cdot 0,035 + 0,016 \cdot 2,053 + 0,027515 + 0,015188 = 0,094801\text{m}^2$$

$$z_h = 0,8048\text{m}$$

$$z_d = 1,2952\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,035^3 + 0,55 \cdot 0,035 \cdot 1,2777^2 = 3,1430 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,053^3 + 0,016 \cdot 2,053 \cdot 0,2337^2 = 1,3332 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = 4,65 \cdot 10^{-4} + 0,027515 \cdot 0,7291^2 = 1,5091 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} + 0,015188 \cdot 0,8042^2 = 1,0140 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 7,00 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

4.2.8 Boulení stěny nosníku

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\frac{M \cdot z_{d,w}}{I}}{\frac{M \cdot z_{h,w}}{I}} = \frac{z_{d,w}}{z_{h,w}} = -\frac{1,2602}{0,7928} = -1,5897$$

pro vnitřní tlačené části, $\psi \in (-1; -3)$

$$\Rightarrow k_\sigma = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 5,98 \cdot (1 + 1,5897)^2 = 40,1054$$

$$t = 0,016\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 2,053\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{2,053/0,016}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{40,1054}} = 0,8769$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,9153 \Rightarrow \rho = \underline{1,0} \dots \text{NEBOULÍ}$$

4.2.9 Průřezové charakteristiky účinného průřezu

$$A_{eff} = 0,094801\text{m}^2$$

$$z_h = 0,8048\text{m}$$

$$z_d = 1,2952\text{m}$$

$$I_{eff} = 7,00 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{7,00 \cdot 10^{-2}}{0,8048} = 8,697 \cdot 10^{-2}\text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{7,00 \cdot 10^{-2}}{0,8048 - 0,012} = 8,829 \cdot 10^{-2}\text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{7,02 \cdot 10^{-2}}{1,2952} = 5,404 \cdot 10^{-2}\text{m}^3$$

4.2.10 Napětí v posuzovaných místech od systému I

$$\sigma_{1,H} = \sigma_{1,I,H} = \frac{M_{Ed,1}^+}{W_{eff,h,H}} = \frac{11,61255}{8,697 \cdot 10^{-2}} = \underline{133,52 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,I} = \frac{M_{Ed,1}^+}{W_{eff,d}} = \frac{11,61255}{5,404 \cdot 10^{-2}} = \underline{214,90 \text{ MPa}}$$

$$\beta > 0,2 \Rightarrow \sigma_{2,H} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20)\sigma_{1,H} = 1,25 \cdot (0,9612 - 0,20)133,52 = 123,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)(1 - \frac{y}{b_0})^4$$

$$\sigma_{3,I,H} = 123,71 + (133,52 - 123,71)(1 - \frac{0,3}{1,65})^4 = \underline{128,11 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{4,I,H} = 123,71 + (133,52 - 123,71)(1 - \frac{0,45}{1,65})^4 = \underline{126,45 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{5,I,H} = 123,71 + (133,52 - 123,71)(1 - \frac{1,5}{1,65})^4 = \underline{123,71 \text{ MPa}}$$

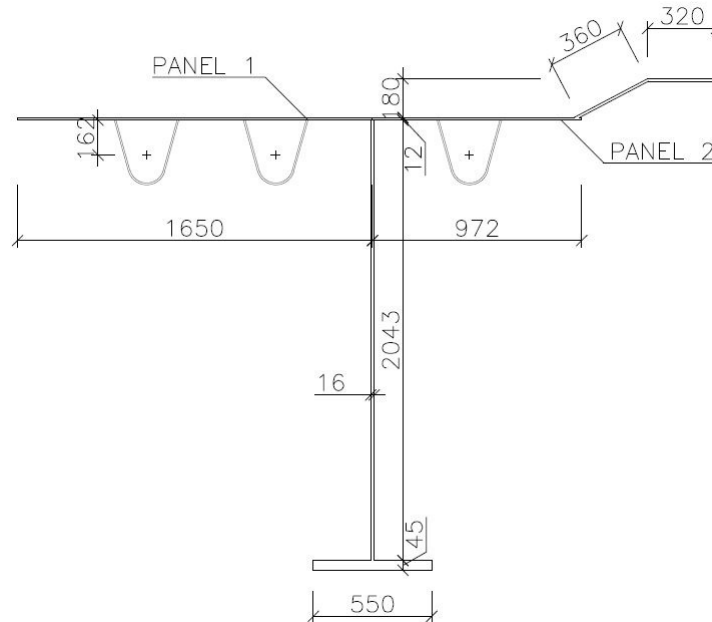
$$\sigma_{1,D} = \sigma_{1,I,D} = \frac{M_{Ed,1}^+}{W_{eff,h,D}} = \frac{11,61255}{8,829 \cdot 10^{-2}} = \underline{131,53 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,D} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20)\sigma_{1,D} = 1,25 \cdot (0,9612 - 0,20)131,53 = 121,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{5,I,D} = 121,87 + (131,53 - 121,87)(1 - \frac{1,5}{1,65})^4 = \underline{121,87 \text{ MPa}}$$

4.3 Hlavní nosník – ve středním poli

4.3.1 Průřezové charakteristiky



Obrázek 30: Průřez pravého hlavního nosníku - ve středním poli

$$A = 0,113862\text{m}^2$$

$$z_h = 0,7668\text{m}$$

$$z_d = 1,3332\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,045^3 + 0,55 \cdot 0,045 \cdot 1,3107^2 = 4,2522 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,043^3 + 0,016 \cdot 2,043 \cdot 0,2667^2 = 1,3694 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 2,622 \cdot 0,012^3 + 2,622 \cdot 0,012 \cdot 0,7608^2 = 1,8213 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,5 \cdot 10^{-8} + 0,36 \cdot 0,012 \cdot 0,8448^2 = 0,3083 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_5 = \frac{1}{12} \cdot 0,32 \cdot 0,012^3 + 0,32 \cdot 0,012 \cdot 0,9408^2 = 0,3399 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_6 = 3 \cdot (5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,5926^2) = 0,5900 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_y = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 8,68 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

4.3.2 Ochabnutí smykem

Panel 1

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 1,65\text{m}$$

$$L_e = 36,975\text{m}$$

$$b_0 = 1,65\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,74\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0112\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0112}{1,65 \cdot 0,012}} = 1,2513$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,2513 \cdot 1,65}{36,975} = 0,0558$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,0558^2} = \underline{0,9804}$$

Panel 2

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 0,97\text{m}$$

$$L_e = 36,975\text{m}$$

$$b_0 = 0,97\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,74\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,008 + (0,36 + 0,32) \cdot 0,012 = 0,0138\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0138}{0,97 \cdot 0,012}} = 1,4772$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,4772 \cdot 0,97}{36,975} = 0,0388$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,0388^2} = \underline{0,9905}$$

4.3.3 Boulení

Boulení tlačného pásu, boulení mezi hlavními nosníky i na konzole ve středním poli je totožné s boulením v krajním poli.

Panel 1

$$A_{c,eff,loc} = \underline{0,030451\text{m}^2}$$

$$\rho_c = \underline{0,9064}$$

Panel 2

$$A_{c,eff,loc} = \underline{0,015372\text{m}^2}$$

$$\rho_c = \underline{0,9891}$$

4.3.4 Interakce ochabnutí smykem a boulení

Panel 1

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9064 \cdot 0,030451 = 0,027601\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,027601 \cdot 0,9804^{0,0558} = \underline{0,027571\text{m}^2}$$

Panel 2

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9891 \cdot 0,015372 = 0,015204\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,015204 \cdot 0,9905^{0,0388} = \underline{0,015198\text{m}^2}$$

4.3.5 Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu

$$A = 0,55 \cdot 0,045 + 0,016 \cdot 2,043 + 0,027571 + 0,015198 = 0,100207\text{m}^2$$

$$z_h = 1,2288\text{m}$$

$$z_d = 0,8712\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,045^3 + 0,55 \cdot 0,045 \cdot 1,2063^2 = 3,6022 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,043^3 + 0,016 \cdot 2,043 \cdot 0,1623^2 = 1,2231 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = 4,65 \cdot 10^{-4} + 0,027571 \cdot 0,7955^2 = 1,7912 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} + 0,015198 \cdot 0,8706^2 = 1,1837 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 7,80 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

4.3.6 Boulení stěny nosníku

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\frac{M \cdot z_{d,w}}{I}}{\frac{M \cdot z_{h,w}}{I}} = \frac{z_{d,w}}{z_{h,w}} = -\frac{1,1838}{0,8592} = -1,3779$$

pro vnitřní tlačené části, $\psi \in (-1; -3)$

$$\Rightarrow k_\sigma = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 5,98 \cdot (1 + 1,3779)^2 = 33,8140$$

$$t = 0,016\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 2,043\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{2,043/0,016}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{33,8140}} = 0,9503$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,9010$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,9465 - 0,055(3 - 1,3779)}{0,9503^2} = \underline{0,9535}$$

$$b_c = 0,8592\text{m}$$

$$b_t = h_w - b_c = 2,043 - 0,8592 = 1,1838\text{m}$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_c = 0,9535 \cdot 0,8592 = 0,8192\text{m}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 0,8192 = 0,3277\text{m}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 0,8192 = 0,4915\text{m}$$

4.3.7 Průřezové charakteristiky účinného průřezu

$$A_{eff} = 0,099568\text{m}^2$$

$$z_h = 0,8538\text{m}$$

$$z_d = 1,2063\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,045^3 + 0,55 \cdot 0,045 \cdot 1,1838^2 = 3,4689 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,0031^3 + 0,016 \cdot 2,0031 \cdot 0,1598^2 = 1,1534 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = 4,65 \cdot 10^{-4} + 0,027571 \cdot 0,7781^2 = 1,7157 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} + 0,015198 \cdot 0,8532^2 = 1,1381 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 7,48 \cdot 10^{-2} \text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{7,48 \cdot 10^{-2}}{0,8538} = 8,76 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{7,48 \cdot 10^{-2}}{0,8538 - 0,012} = 8,88 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{7,48 \cdot 10^{-2}}{1,2063} = 6,20 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

4.3.8 Napětí v posuzovaných místech od systému I

$$\sigma_{1,H} = \sigma_{1,I,H} = \frac{M_{Ed,2}^+}{W_{eff,h,H}} = \frac{17,70276}{8,76 \cdot 10^{-2}} = \underline{202,16 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,I} = \frac{M_{Ed,2}^+}{W_{eff,d}} = \frac{17,70276}{6,20 \cdot 10^{-2}} = \underline{285,65 \text{ MPa}}$$

$$\beta > 0,2 \Rightarrow \sigma_{2,H} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,H} = 1,25 \cdot (0,9804 - 0,20) 202,16 = 192,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 - \frac{y}{b_0}\right)^4$$

$$\sigma_{3,I,H} = 192,17 + (202,16 - 192,17) \left(1 - \frac{0,3}{1,65}\right)^4 = \underline{196,65 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{5,I,H} = 192,17 + (202,16 - 192,17) \left(1 - \frac{1,5}{1,65}\right)^4 = \underline{192,17 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{1,D} = \sigma_{1,I,D} = \frac{M_{Ed,2}^+}{W_{eff,h,D}} = \frac{17,70276}{8,88 \cdot 10^{-2}} = \underline{199,32 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,D} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,D} = 1,25 \cdot (0,9804 - 0,20) 199,32 = 189,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{5,I,D} = 189,47 + (199,32 - 189,47) \left(1 - \frac{1,5}{1,65}\right)^4 = \underline{189,47 \text{ MPa}}$$

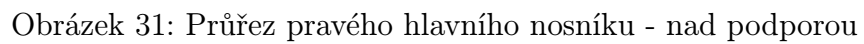
Bod 4 není ovlivněn boulením stěny:

$$\sigma_1^* = \frac{M_{Ed,2}^+ \cdot z_h}{I} = \frac{17,70276 \cdot 0,8712}{7,80 \cdot 10^{-2}} = 197,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2^* = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_1^* = 1,25 \cdot (0,9804 - 0,20) 197,71 = 187,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{4,I,H} = 187,93 + (197,71 - 187,93) \left(1 - \frac{0,45}{1,65}\right)^4 = \underline{190,67 \text{ MPa}}$$

4.4.1 Průřezové charakteristiky



$$I_y = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 8,68 \cdot 10^{-2} \text{m}^4$$

4.4.2 Ochabnutí smykem

Panel 1

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 1,65\text{m}$$

$$L_1 = 30,60\text{m}$$

$$L_2 = 5,7375\text{m}$$

$$L_e = 0,25 \cdot L_1 + L_2 = 0,25 \cdot 30,6 + 5,7375 = 13,39\text{m}$$

$$b_0 = 1,65\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,27\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,008 = 0,0112\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0112}{1,65 \cdot 0,012}} = 1,2513$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,2513 \cdot 1,65}{13,39} = 0,1542$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,1542^2} = \underline{0,5134}$$

Panel 2

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 0,97\text{m}$$

$$L_e = 0,25 \cdot L_1 + L_2 = 0,25 \cdot 30,6 + 5,7375 = 13,39\text{m}$$

$$b_0 = 1,65\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,27\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,008 + (0,36 + 0,32) \cdot 0,012 = 0,0138\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0,0138}{0,97 \cdot 0,012}} = 1,4772$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1,4772 \cdot 0,97}{13,39} = 0,1070$$

$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,1070^2} = \underline{0,6105}$$

4.4.3 Boulení

Boulení tlačného pásu, boulení mezi hlavními nosníky i na konzole ve středním poli je totožné s boulením v krajním poli.

Panel 1

$$A_{c,eff,loc} = \underline{0,030451\text{m}^2}$$

$$\rho_c = \underline{0,9064}$$

Panel 2

$$A_{c,eff,loc} = \underline{0,015372\text{m}^2}$$

$$\rho_c = \underline{0,9891}$$

4.4.4 Interakce ochabnutí smykem a boulení

Panel 1

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9064 \cdot 0,030451 = 0,027601\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,027601 \cdot 0,5134^{0,1542} = \underline{0,024905\text{m}^2}$$

Panel 2

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c = 0,9891 \cdot 0,015372 = 0,015204\text{m}^2$$

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^\kappa = 0,015204 \cdot 0,6105^{0,1070} = \underline{0,014422\text{m}^2}$$

4.4.5 Průřezové charakteristiky oslabeného průřezu

$$A = 0,55 \cdot 0,045 + 0,016 \cdot 2,043 + 0,024905 + 0,014422 = 0,096764\text{m}^2$$

$$z_h = 0,9001\text{m}$$

$$z_d = 1,1999\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,045^3 + 0,55 \cdot 0,045 \cdot 1,1774^2 = 3,4317 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 2,043^3 + 0,016 \cdot 2,043 \cdot 0,1334^2 = 1,1952 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = 4,65 \cdot 10^{-4} + 0,024905 \cdot 0,8244^2 = 1,7390 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} + 0,014422 \cdot 0,8995^2 = 1,1986 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 7,56 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

4.4.6 Boulení stěny nosníku

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\frac{M \cdot z_{d,w}}{I}}{\frac{M \cdot z_{h,w}}{I}} = \frac{z_{d,w}}{z_{h,w}} = -\frac{1,1549}{0,8881} = -1,3005$$

pro vnitřní tlačené části, $\psi \in (-1; -3)$

$$\Rightarrow k_\sigma = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 5,98 \cdot (1 + 1,3005)^2 = 31,6484$$

$$t = 0,016\text{m}$$

$$b_{c,loc} = 2,043\text{m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{2,043/0,016}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{31,6484}} = 0,9823$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,8956$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,9785 - 0,055(3 - 1,3005)}{0,9823^2} = \underline{0,9212}$$

$$b_c = 0,8881\text{m}$$

$$b_t = h_w - b_c = 2,043 - 0,8881 = 1,1549\text{m}$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_c = 0,9212 \cdot 0,8881 = 0,8181\text{m}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 0,8181 = 0,3272\text{m}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 0,8181 = 0,4908\text{m}$$

4.4.7 Průřezové charakteristiky účinného průřezu

$$A_{eff} = 0,095644\text{m}^2$$

$$z_h = 0,8688\text{m}$$

$$z_d = 1,1612\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,55 \cdot 0,045^3 + 0,55 \cdot 0,045 \cdot 1,1387^2 = 3,2094 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,016 \cdot 1,9730^3 + 0,016 \cdot 1,9730 \cdot 0,1297^2 = 1,0771 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_3 = 4,65 \cdot 10^{-4} + 0,024905 \cdot 0,7932^2 = 1,6132 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_4 = 3,17 \cdot 10^{-4} + 0,014422 \cdot 0,8683^2 = 1,1190 \cdot 10^{-2}\text{m}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 7,02 \cdot 10^{-2} \text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{7,02 \cdot 10^{-2}}{0,8688} = 8,078 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{7,02 \cdot 10^{-2}}{0,8688 - 0,012} = 8,192 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{7,02 \cdot 10^{-2}}{1,1612} = 6,045 \cdot 10^{-2} \text{m}^3$$

4.4.8 Napětí v posuzovaných místech od systému I

$$\sigma_{1,H} = \sigma_{1,I,H} = \frac{M_{Ed,b}^-}{W_{eff,h,H}} = \frac{12,11027}{8,078 \cdot 10^{-2}} = \underline{149,91 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,I} = \frac{M_{Ed,b}^-}{W_{eff,d}} = \frac{12,11027}{6,045 \cdot 10^{-2}} = \underline{200,35 \text{ MPa}}$$

$$\beta > 0,2 \Rightarrow \sigma_{2,H} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,H} = 1,25 \cdot (0,5134 - 0,20) 149,91 = 54,98 \text{ MPa}$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 - \frac{y}{b_0}\right)^4$$

$$\sigma_{3,I,H} = 54,98 + (149,91 - 54,98) \left(1 - \frac{0,3}{1,65}\right)^4 = \underline{97,52 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{5,I,H} = 54,98 + (149,91 - 54,98) \left(1 - \frac{1,5}{1,65}\right)^4 = \underline{54,99 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{1,D} = \sigma_{1,I,D} = \frac{M_{Ed,b}^-}{W_{eff,h,D}} = \frac{12,11027}{8,192 \cdot 10^{-2}} = \underline{147,84 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,D} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,D} = 1,25 \cdot (0,5134 - 0,20) 147,84 = 54,22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{5,I,D} = 54,22 + (147,84 - 54,22) \left(1 - \frac{1,5}{1,65}\right)^4 = \underline{54,23 \text{ MPa}}$$

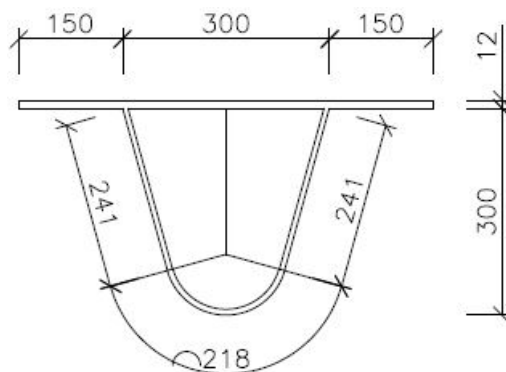
Bod 4 není ovlivněn boulením stěny:

$$\sigma_1^* = \frac{M_{Ed,b}^- \cdot z_h}{I} = \frac{12,11027 \cdot 0,9001}{7,56 \cdot 10^{-2}} = 144,09 \text{ MPa}$$

$$\beta > 0,2 \Rightarrow \sigma_2^* = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_1^* = 1,25 \cdot (0,5134 - 0,20) 144,09 = 52,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{4,I} = 52,85 + (144,09 - 52,85) \left(1 - \frac{0,45}{1,65}\right)^4 = \underline{78,37 \text{ MPa}}$$

4.5 Podélné výztuhy



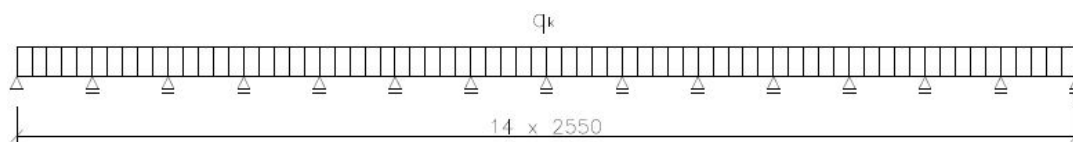
Obrázek 32: Průřez podélné výztuhy mostovky

4.5.1 Zatížení a vnitřní síly

V této části jsou uvedena zatížení působící na podélnou výztuhu. Jednotlivé zatěžovací stavy byly zadány do programu Scia Engineer 2013.1 a byly spočítány vnitřní síly v rozhodujících místech. Je nutné zjistit maximální ohybový moment M_6^+ v 6. poli podélné výztuhy, $M_{7,max}^-$ nad 7. podporou a příslušnou posouvající sílu a dále maximální posouvající sílu $V_{7,max}$ a k ní příslušný ohybový moment.

Stálé zatížení

mostkový plech	$0,012 \cdot 0,6 \cdot 80 =$	0,58 kN/m
vlastní tíha výztuhy	$0,7 \cdot 0,008 \cdot 80 =$	0,45 kN/m
živičné vrstvy na vozovce	$0,08 \cdot 0,6 \cdot 22 =$	1,06 kN/m
CELKEM		2,08 kN/m



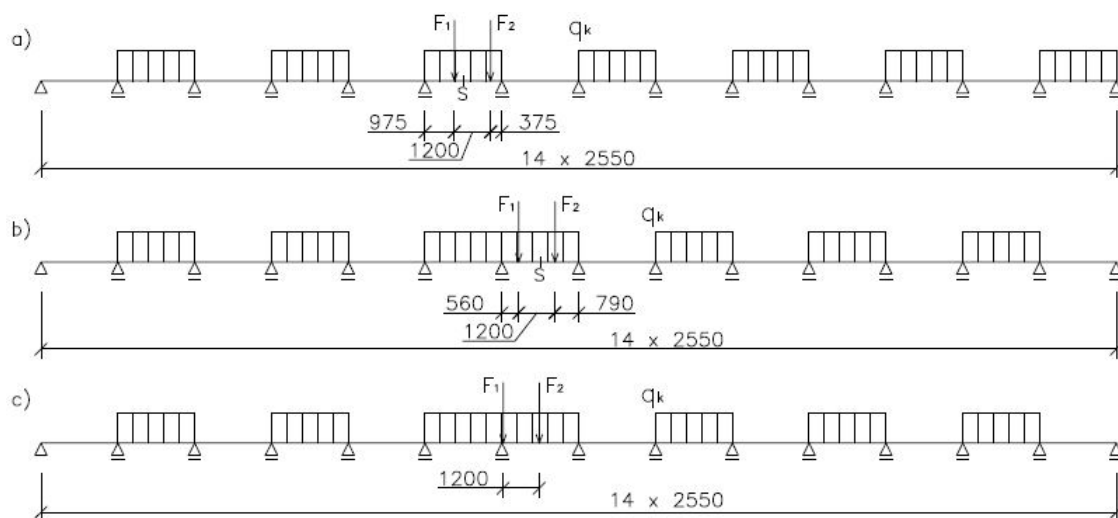
Obrázek 33: Statické schéma podélné výztuhy se stálým zatížením

Zatížení dopravou – sestava zatížení gr1a

Na podélnou výztuhu bude vzhledem k její šířce $l_{sl} = 0,6\text{ m}$ umístěn pouze jeden zatěžovací pruh (pruh č.1) a jedna nápravová síla.

Nápravová síla: $\alpha_{Q,i} \cdot Q_{ik} = 1,0 \cdot 300 = 300\text{ kN}$ ($F_1 = F_2 = 150\text{ kN}$)

Rovnoměrné zatížení: $\alpha_{q,i} \cdot q_{ik} \cdot l_{sl} = 1,0 \cdot 9,0 \cdot 0,6 = 5,4\text{ kN/m}$



Obrázek 34: Rozmístění zatížení sestavy gr1a na podélné výztuze pro získání maximálních hodnot: a) $M_{q,6}^+$, b) $M_{q,7,max}^-$, c) $V_{q,7,max}$

Charakteristické vnitřní síly a reakce

Umístění	Vnitřní síly	Stálé zatížení	Sestava zatížení gr1a
1.	M_6^+ [kNm]	0,56	71,44
2.	$M_{7,max}^-$ [kNm]	1,13	51,44
	V_7 [kN]	2,65	172,45
3.	$V_{7,max}$ [kN]	2,65	237,25
	M_7^- [kNm]	1,13	35,65

Tabulka 11: Charakteristické hodnoty vnitřních sil na podélné výztuze

Návrhové vnitřní síly

Návrhové vnitřní síly budou vypočítány pomocí vztahu

$$X_{Ed} = \gamma_G \cdot X_G + \gamma_Q \cdot X_q,$$

kde X označuje charakteristickou hodnotu dané vnitřní síly, $\gamma_G = 1,35$ je součinitel stálých zatížení a $\gamma_Q = 1,35$ je součinitel proměnných zatížení dopravou.

1. $M_{Ed,6}^+ = \gamma_G \cdot M_{g,6}^+ + \gamma_Q \cdot M_{q,6}^+ = 1,35 \cdot 0,56 + 1,35 \cdot 71,44 = \underline{97,20\text{kNm}}$
 $V_{Ed,6} = \underline{0\text{kN}}$
2. $M_{Ed,7,max}^- = \gamma_G \cdot M_{g,7}^- + \gamma_Q \cdot M_{q,7,max}^- = 1,35 \cdot 1,13 + 1,35 \cdot 51,44 = \underline{70,97\text{kNm}}$
 $V_{Ed,7} = \gamma_G \cdot V_{g,7} + \gamma_Q \cdot V_{q,7} = 1,35 \cdot 2,65 + 1,35 \cdot 172,45 = \underline{236,39\text{kN}}$
3. $V_{Ed,7,max} = \gamma_G \cdot V_{g,7} + \gamma_Q \cdot V_{q,7,max} = 1,35 \cdot 2,65 + 1,35 \cdot 237,25 = \underline{323,87\text{kN}}$
 $M_{Ed,7}^- = \gamma_G \cdot M_{g,7}^- + \gamma_Q \cdot M_{q,7}^- = 1,35 \cdot 1,13 + 1,35 \cdot 35,65 = \underline{49,65\text{kNm}}$

4.6 Podélná výztuha – v poli

4.6.1 Ochabnutí smykem

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 0,15\text{m}$$

$$L_e = 0,7 \cdot L = 0,7 \cdot 2,55 = 1,79\text{m}$$

$$b_0 = 0,15\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,0357\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 0\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0}{0,15 \cdot 0,012}} = 1$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1 \cdot 0,15}{1,79} = 0,0840$$

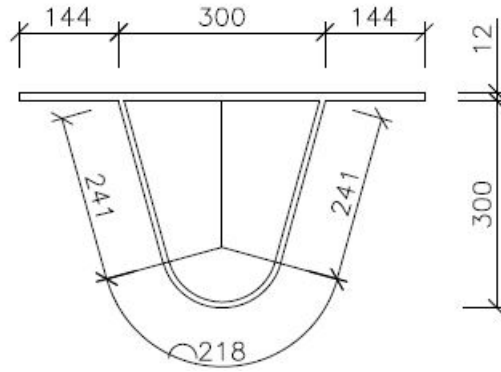
$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,0840^2} = \underline{0,9568}$$

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0 = 0,9568 \cdot 0,15 = \underline{0,144\text{m}}$$

4.6.2 Průřezové charakteristiky

$$A_{eff} = 2 \cdot 0,144 \cdot 0,012 + 0,3 \cdot 0,012 + 0,7 \cdot 0,008 = 0,012644\text{m}^2$$



Obrázek 35: Efektivní průřez střední podélné výztuhy mostovky

$$z_h = \frac{2 \cdot 0,144 \cdot 0,012^2/2 + 0,3 \cdot 0,012^2/2 + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,1742}{0,012644} = 0,0805\text{m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,312 - 0,0805 = 0,2315\text{m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,144 \cdot 0,012^3 + 0,144 \cdot 0,012 \cdot 0,0745^2 = 0,19 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,3 \cdot 0,012^3 + 0,3 \cdot 0,012 \cdot 0,0745^2 = 0,20 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_3 = 5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,0937^2 = 5,25 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 = 0,19 \cdot 10^{-4} + 0,20 \cdot 10^{-4} + 5,25 \cdot 10^{-4} = 5,64 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{5,64 \cdot 10^{-4}}{0,0805} = 7,007 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{5,64 \cdot 10^{-4}}{0,0805 - 0,012} = 8,234 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{5,64 \cdot 10^{-4}}{0,2315} = 2,436 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

4.6.3 Napětí od mostovky – mezi příčnými výztuhami

$$\sigma_{3,II,H} = \sigma_{5,II,H} = \frac{M_{Ed,6}^+}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,09720}{7,007 \cdot 10^{-3}} = \underline{13,87\text{MPa}}$$

$$\sigma_{4,II} = \frac{M_{Ed,6}^+}{W_{eff,d}} = \frac{0,09720}{2,436 \cdot 10^{-3}} = \underline{39,90\text{MPa}}$$

$$\sigma_{5,II,D} = \frac{M_{Ed,6}^+}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,09720}{8,234 \cdot 10^{-3}} = \underline{11,80\text{MPa}}$$

$$\tau_{5,II,H} = \tau_{5,II,D} = \underline{0\text{MPa}}$$

4.7 Podélná výztuha – nad podporou

4.7.1 Ochabnutí smykem

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 0,15\text{m}$$

$$L_e = 0,25 \cdot (L_1 + L_2) = 0,25 \cdot (2,55 + 2,55) = 1,28\text{m}$$

$$b_0 = 0,15\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,0256\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 0\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0}{0,15 \cdot 0,012}} = 1$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1 \cdot 0,15}{1,28} = 0,1176$$

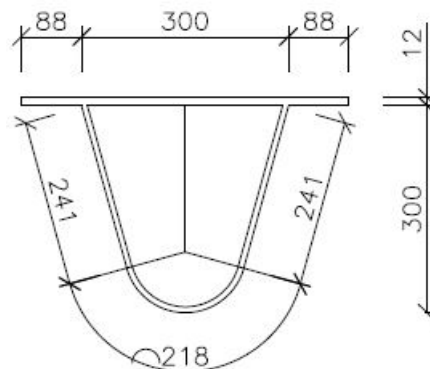
$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, záporný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left(\kappa - \frac{1}{2500 \cdot \kappa} \right) + 1,6 \cdot \kappa^2} =$$

$$= \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left(0,1176 - \frac{1}{2500 \cdot 0,1176} \right) + 1,6 \cdot 0,1176^2} = \underline{0,5856}$$

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0 = 0,5856 \cdot 0,15 = \underline{0,088\text{m}}$$

4.7.2 Průřezové charakteristiky



Obrázek 36: Efektivní průřez krajní podélné výztuhy mostovky

$$A_{eff} = 2 \cdot 0,088 \cdot 0,012 + 0,3 \cdot 0,012 + 0,7 \cdot 0,008 = 0,011308\text{m}^2$$

$$z_h = \frac{2 \cdot 0,088 \cdot 0,012^2/2 + 0,3 \cdot 0,012^2/2 + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,1742}{0,011308} = 0,0893 \text{ m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,312 - 0,0893 = 0,2227 \text{ m}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 0,088 \cdot 0,012^3 + 0,088 \cdot 0,012 \cdot 0,0833^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,3 \cdot 0,012^3 + 0,3 \cdot 0,012 \cdot 0,0833^2 = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_3 = 5,58 \cdot 10^{-8} + 0,7 \cdot 0,008 \cdot 0,0849^2 = 4,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 = 0,15 \cdot 10^{-4} + 0,25 \cdot 10^{-4} + 4,76 \cdot 10^{-4} = 5,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{5,15 \cdot 10^{-4}}{0,0893} = 5,770 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{5,15 \cdot 10^{-4}}{0,0893 - 0,012} = 6,665 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{5,15 \cdot 10^{-4}}{0,2227} = 2,313 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\bar{S}_{y,D} = A_{plech} \cdot z_T = 0,012 \cdot (0,3 + 2 \cdot 0,088) \cdot (0,0893 - 0,006) = 4,755 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

4.7.3 Napětí od mostovky – nad příčnou výztuhou

Pro maximální ohybový moment a příslušnou posouvající sílu (2. umístění):

$$\sigma_{3,II,H} = \sigma_{5,II,H} = \frac{M_{Ed,7,max}^-}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,07097}{5,770 \cdot 10^{-3}} = \underline{12,30 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{4,II} = \frac{M_{Ed,7,max}^-}{W_{eff,d}} = \frac{0,07097}{2,313 \cdot 10^{-3}} = \underline{30,68 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{5,II,D} = \frac{M_{Ed,7,max}^-}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,07097}{6,665 \cdot 10^{-3}} = \underline{10,65 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{5,II,H} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{5,II,D} = \frac{V_{Ed,7} \cdot \bar{S}_{y,D}}{I_{eff} \cdot b} = \frac{0,23639 \cdot 4,755 \cdot 10^{-4}}{5,15 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,008} = \underline{13,63 \text{ MPa}}$$

Pro maximální posouvající sílu a příslušný ohybový moment (3. umístění):

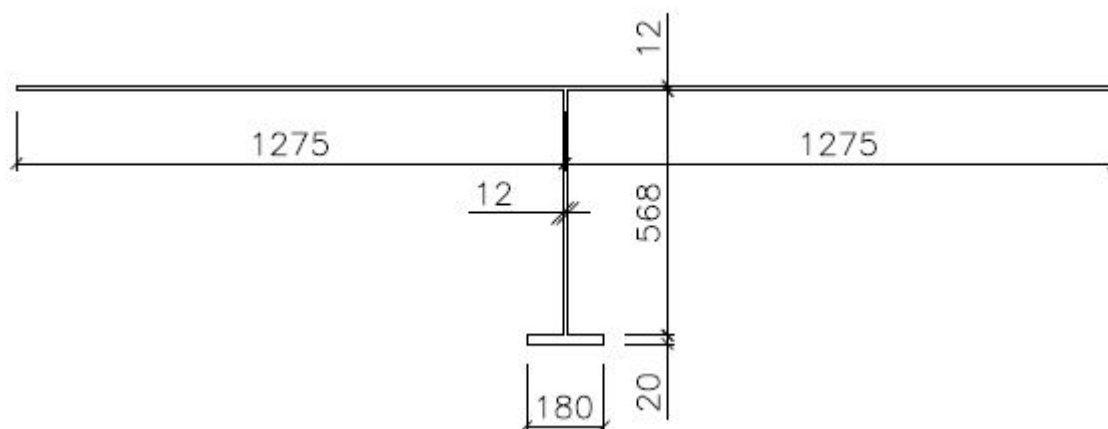
$$\sigma_{5,II,H} = \frac{M_{Ed,7}^-}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,04965}{5,770 \cdot 10^{-3}} = \underline{8,61 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{5,II,D} = \frac{M_{Ed,7}^-}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,04965}{6,665 \cdot 10^{-3}} = \underline{7,45 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{5,II,H} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{5,II,D} = \frac{V_{Ed,7,max} \cdot \bar{S}_{y,D}}{I_{eff} \cdot b} = \frac{0,32387 \cdot 4,755 \cdot 10^{-4}}{5,15 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,008} = \underline{18,68 \text{ MPa}}$$

4.8 Příčné výztuhy



Obrázek 37: Průřez příčné výztuhy mostovky

4.8.1 Zatížení a vnitřní síly

V této části jsou uvedena zatížení působící na příčnou výztuhu. Jednotlivé zatěžovací stavy byly zadány do programu Scia Engineer 2013.1 a byly spočítány potřebné vnitřní síly v rozhodujících řezech.

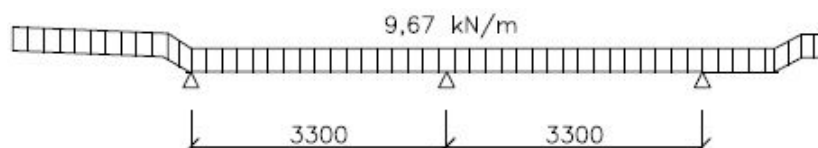
Je nutné zjistit maximální ohybový moment M^+ v poli mezi hlavními nosníky (příslušná posouvající síla bude nulová), maximální ohybový moment M_1^- nad podporou a k němu příslušnou posouvající sílu V_1 .

Dále bude zjištěna maximální posouvající síla u podpory V_2 a k ní příslušný ohybový moment M_2^- pro posouzení připoje příčné výztuhy k hlavnímu nosníku.

Příčná výztuha je uvažována jako spojitý nosník, výstižnější by bylo použití pružných podpor, ale postup je na stranu bezpečnou.

Stálé zatížení

mostovkový plech	$0,012 \cdot 2,55 \cdot 80 =$	2,45 kN/m
vlastní tíha výztuhy	$(0,012 \cdot 0,568 + 0,020 \cdot 0,180) \cdot 80 =$	0,83 kN/m
podélné výztuhy	$\frac{0,008 \cdot 0,7 \cdot 2,55 \cdot 80}{0,6} =$	1,90 kN/m
živičné vrstvy na vozovce	$0,08 \cdot 2,55 \cdot 22 =$	4,49 kN/m
CELKEM		9,67 kN/m



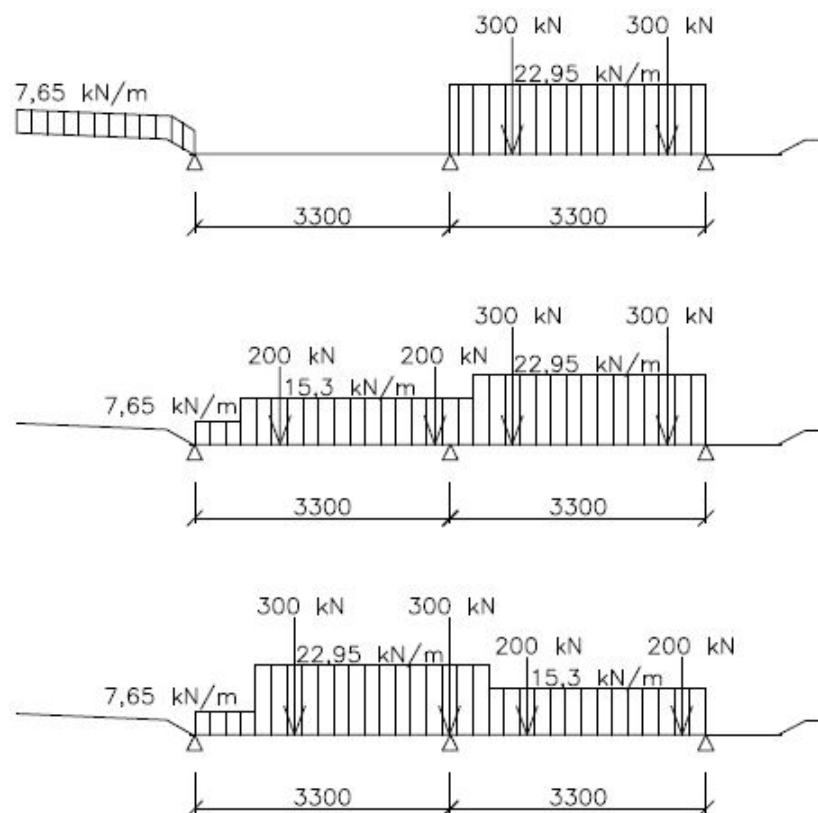
Obrázek 38: Statické schéma příčné výztuhy se stálým zatížením

Zatížení dopravou – sestava zatížení gr1a

Aby v pravém poli příčné výztuhy vznikl maximální ohybový moment, bude na příčnou výztuhu umístěn zatěžovací pruh č.1 do pravého pole mezi hlavní nosníky a vlevo bude zatížen chodník (obr. 39a). Maximální nadpodporový ohybový moment vznikne, když se zatíží příčná výztuha v obou polích mezi hlavními nosníky (obr. 39b). Maximální posouvající síla v podpoře vznikne při umístění rovnoměrného zatížení do obou polí mezi hlavní nosníky a náprav do blízkosti podpory (obr. 39c).

Umístění	Nápravové síly $\alpha_{Q,i} \cdot Q_{ik}$ [kN]	Rovnoměrné zatížení $\alpha_{q,i} \cdot q_{ik} \cdot l_{sl,2}$ [kN/m]
Pruh č. 1	300	22,95
Pruh č. 2	200	15,30
Zbývající plocha	0	7,65
Chodník	0	7,65

Tabulka 12: Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a na příčné výztuze



Obrázek 39: Rozmístění zatížení sestavy gr1a na příčné výztuze pro získání maximálních hodnot: a) M^+ , b) $M_{b,1}^-$, c) $V_{b,2}$

Charakteristické vnitřní síly a reakce

Vnitřní síly	Stálé zatížení	Sestava zatížení gr1a
M^+ [kNm]	4,73	168,04
M_1^- [kNm]	4,43	196,04
V_1 [kN]	13,31	367,75
V_2 [kN]	13,31	504,67
M_2^- [kNm]	4,43	171,51

Tabulka 13: Charakteristické hodnoty vnitřních sil na příčné výztuze

Návrhové vnitřní síly

Návrhové vnitřní síly budou vypočítány pomocí vztahu

$$X_{Ed} = \gamma_G \cdot X_G + \gamma_Q \cdot X_q,$$

kde X označuje charakteristickou hodnotu dané vnitřní síly, $\gamma_G = 1,35$ je součinitel stálých zatížení a $\gamma_Q = 1,35$ je součinitel proměnných zatížení dopravou.

$$M_{Ed}^+ = \gamma_G \cdot M_g^+ + \gamma_Q \cdot M_q^+ = 1,35 \cdot 4,73 + 1,35 \cdot 168,04 = \underline{233,24\text{kNm}}$$

$$M_{Ed,1}^- = \gamma_G \cdot M_{g,1}^- + \gamma_Q \cdot M_{q,1}^- = 1,35 \cdot 4,43 + 1,35 \cdot 196,04 = \underline{270,63\text{kNm}}$$

$$V_{Ed,1} = \gamma_G \cdot V_{g,1} + \gamma_Q \cdot V_{q,1} = 1,35 \cdot 13,31 + 1,35 \cdot 367,75 = \underline{514,43\text{kN}}$$

$$V_{Ed,2} = \gamma_G \cdot V_{g,2} + \gamma_Q \cdot V_{q,2} = 1,35 \cdot 13,31 + 1,35 \cdot 504,67 = \underline{699,27\text{kN}}$$

$$M_{Ed,2}^- = \gamma_G \cdot M_{g,2}^- + \gamma_Q \cdot M_{q,2}^- = 1,35 \cdot 4,43 + 1,35 \cdot 171,51 = \underline{237,52\text{kNm}}$$

4.9 Příčná výztuha – v poli

4.9.1 Ochabnutí smykem

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 1,275\text{m}$$

$$L_e = 0,7 \cdot L = 0,7 \cdot 3,3 = 2,31\text{m}$$

$$b_0 = 1,275\text{m} > \frac{L_e}{50} = 0,0462\text{m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 0\text{m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0}{1,275 \cdot 0,012}} = 1$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1 \cdot 1,275}{2,31} = 0,5519$$

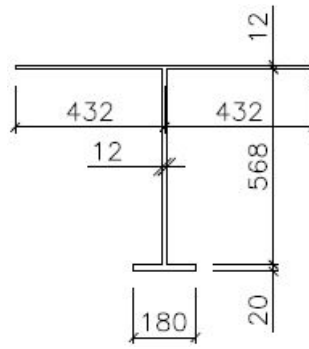
$\kappa \in \langle 0,02; 0,7 \rangle$, kladný ohybový moment

$$\Rightarrow \beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2} = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 0,5519^2} = \underline{0,3390}$$

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0 = 0,3390 \cdot 1,275 = 0,432\text{m}$$

4.9.2 Průřezové charakteristiky

$$A_{eff} = 2 \cdot 0,432 \cdot 0,012 + 0,012 \cdot 0,568 + 0,18 \cdot 0,02 = 0,020790\text{m}^2$$



Obrázek 40: Efektivní průřez příčné výztuhy mostovky v poli

$$z_h = \frac{2 \cdot 0,432 \cdot 0,012^2/2 + 0,012 \cdot 0,568 \cdot 0,296 + 0,18 \cdot 0,02 \cdot 0,59}{0,020790} = 0,2022\text{m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,6 - 0,2022 = 0,3978\text{m}$$

$$I_1 = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 0,432 \cdot 0,012^3 + 0,432 \cdot 0,012 \cdot 0,1962^2 \right) = 3,99 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,012 \cdot 0,568^3 + 0,012 \cdot 0,568 \cdot 0,0938^2 = 2,43 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 0,18 \cdot 0,02^3 + 0,18 \cdot 0,02 \cdot 0,3878^2 = 5,42 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 = 3,99 \cdot 10^{-4} + 2,43 \cdot 10^{-4} + 5,42 \cdot 10^{-4} = 11,84 \cdot 10^{-4}\text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{11,84 \cdot 10^{-4}}{0,2022} = 5,86 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{11,84 \cdot 10^{-4}}{0,2022 - 0,012} = 6,23 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{11,84 \cdot 10^{-4}}{0,3978} = 2,98 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

4.9.3 Napětí v příčném směru – mezi hlavními nosníky

$$\sigma_{5,pr,H} = \sigma_{1,H} = \frac{M_{Ed}^+}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,23324}{5,86 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{39,83 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{5,pr,D} = \sigma_{1,D} = \frac{M_{Ed}^+}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,23324}{6,23 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{37,46 \text{ MPa}}}$$

$$\beta > 0,2 \Rightarrow \sigma_2 = 1,25 \cdot (\beta - 0,20)\sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)\left(1 - \frac{y}{b_0}\right)^4$$

$$\sigma_{2,H} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,H} = 1,25 \cdot (0,3390 - 0,20) 39,83 = 6,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{5,pr,H}^* = 6,92 + (39,83 - 6,92) \left(1 - \frac{1,275}{1,275}\right)^4 = \underline{6,92 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{2,D} = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \sigma_{1,D} = 1,25 \cdot (0,3390 - 0,20) 37,46 = 6,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{5,pr,D}^* = 6,51 + (37,46 - 6,51) \left(1 - \frac{1,275}{1,275}\right)^4 = \underline{6,51 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{5,pr,H} = \tau_{5,pr,H}^* = \tau_{5,pr,D} = \tau_{5,pr,D}^* = \underline{0 \text{ MPa}}$$

4.10 Příčná výztuha – nad podporou

4.10.1 Ochabnutí smykem

Lze zanedbat, když $b_0 \leq \frac{L_e}{50}$.

$$b_0 = 1,275 \text{ m}$$

$$L_e = 0,25 \cdot (L_1 + L_2) = 0,25 \cdot (3,3 + 3,3) = 1,65 \text{ m}$$

$$b_0 = 1,275 \text{ m} > \frac{L_e}{50} = 0,0330 \text{ m}$$

\Rightarrow **nevyhoví, smykové ochabnutí nelze zanedbat!**

$$A_{sl} = 0 \text{ m}^2$$

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}} = \sqrt{1 + \frac{0}{1,275 \cdot 0,012}} = 1$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = \frac{1 \cdot 1,275}{1,65} = 0,7727$$

$$\kappa > 0,7, \text{ záporný ohybový moment}$$

$$\Rightarrow \beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \cdot \kappa} = \frac{1}{8,6 \cdot 0,7727} = \underline{0,1505}$$

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0 = 0,1505 \cdot 1,275 = 0,192 \text{ m}$$

4.10.2 Průřezové charakteristiky

$$A_{eff} = 2 \cdot 0,192 \cdot 0,012 + 0,012 \cdot 0,568 + 0,18 \cdot 0,02 = 0,015021 \text{ m}^2$$

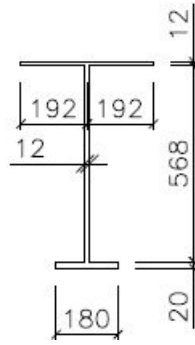
$$z_h = \frac{2 \cdot 0,192 \cdot 0,012^2 / 2 + 0,012 \cdot 0,568 \cdot 0,296 + 0,18 \cdot 0,02 \cdot 0,59}{0,015021} = 0,2776 \text{ m}$$

$$z_d = h - z_h = 0,6 - 0,2776 = 0,3224 \text{ m}$$

$$I_1 = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 0,192 \cdot 0,012^3 + 0,192 \cdot 0,012 \cdot 0,2716^2 \right) = 3,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 0,012 \cdot 0,568^3 + 0,012 \cdot 0,568 \cdot 0,0184^2 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 0,18 \cdot 0,02^3 + 0,18 \cdot 0,02 \cdot 0,3124^2 = 3,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Obrázek 41: Efektivní průřez příčné výztuhy mostovky nad podporou

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 = 3,40 \cdot 10^{-4} + 1,86 \cdot 10^{-4} + 3,52 \cdot 10^{-4} = 8,77 \cdot 10^{-4} \text{m}^4$$

$$W_{eff,h,H} = \frac{I_{eff}}{z_h} = \frac{8,77 \cdot 10^{-4}}{0,2776} = 3,16 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$$

$$W_{eff,h,D} = \frac{I_{eff}}{z_h - t} = \frac{8,77 \cdot 10^{-4}}{0,2776 - 0,012} = 3,30 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$$

$$W_{eff,d} = \frac{I_{eff}}{z_d} = \frac{8,77 \cdot 10^{-4}}{0,3224} = 2,72 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$$

$$\bar{S}_{y,D} = A_{plech} \cdot z_T = 0,012 \cdot 2 \cdot 0,192 \cdot (0,2776 - 0,006) = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$$

4.10.3 Napětí v příčném směru – nad hlavním nosníkem

Pro maximální ohybový moment $M_{Ed,1}^-$ a příslušnou posouvající sílu:

$$\sigma_{1,pr,H} = \frac{M_{Ed,1}^-}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,27063}{3,16 \cdot 10^{-3}} = \underline{85,68 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{1,pr,D} = \frac{M_{Ed,1}^-}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,27063}{3,30 \cdot 10^{-3}} = \underline{81,97 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{1,pr,H} = \underline{0 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{1,pr,D} = \frac{V_{Ed,1} \cdot \bar{S}_{y,D}}{I_{eff} \cdot b} = \frac{0,51443 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{8,77 \cdot 10^{-4} \cdot 0,012} = \underline{61,14 \text{ MPa}}$$

Pro maximální posouvající sílu $V_{Ed,2}$ a příslušný ohybový moment:

$$\sigma_{1,pr,H} = \frac{M_{Ed,2}^-}{W_{eff,h,H}} = \frac{0,23752}{3,16 \cdot 10^{-3}} = \underline{75,19 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{1,pr,D} = \frac{M_{Ed,2}^-}{W_{eff,h,D}} = \frac{0,23752}{3,30 \cdot 10^{-3}} = \underline{71,94 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{1,pr,H} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{1,pr,D} = \frac{V_{Ed,2} \cdot \bar{S}_{y,D}}{I_{eff} \cdot b} = \frac{0,69927 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{8,77 \cdot 10^{-4} \cdot 0,012} = \underline{83,11 \text{ MPa}}$$

4.11 Posouzení příčných výztuh

4.11.1 Posouzení příčných výztuh na ohyb

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 4.6.

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{\frac{f_y \cdot W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0$$

Mezi hlavními nosníky:

$$\eta_1 = \frac{\frac{M_{Ed}^+}{f_y \cdot W_{eff,h}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,23324}{355 \cdot 5,86 \cdot 10^{-3}} = 0,1122 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

$$\eta_1 = \frac{\frac{M_{Ed}^+}{f_y \cdot W_{eff,d}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,23324}{355 \cdot 2,98 \cdot 10^{-3}} = 0,2207 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

Nad podporou:

$$\eta_1 = \frac{\frac{M_{Ed,b}^-}{f_y \cdot W_{eff,h}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,27063}{355 \cdot 3,16 \cdot 10^{-3}} = 0,2413 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

$$\eta_1 = \frac{\frac{M_{Ed,b}^-}{f_y \cdot W_{eff,d}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,27063}{355 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3}} = 0,2804 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

4.11.2 Posouzení příčných výztuh na smyk

Výpočet proveden dle ČSN EN 1993-1-5, 5. Stěna se musí posoudit na únosnost při boulení ve smyku, pokud $\frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \epsilon$.

$$h_w = 568 \text{ mm}$$

$$t = 12 \text{ mm}$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\eta = 1,20 \text{ (pro oceli do třídy S460)}$$

$$\frac{h_w}{t} = \frac{568}{12} = 48,833 > \frac{72}{\eta} \epsilon = \frac{72}{1,20} 0,81 = 48,817$$

\Rightarrow **Musí se posoudit únosnost při boulení ve smyku!**

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Příspěvek pásnice: $V_{bf,Rd}$ zanedbáno

$$\text{Příspěvek stojiny: } V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4t\epsilon} = \frac{568}{86,4 \cdot 12 \cdot 0,81} = 0,6733$$

$$\bar{\lambda}_w < \frac{0,83}{\eta} = \frac{0,83}{1,20} = 0,6917 \Rightarrow \chi_w = \eta = 1,20$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,20 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 0,568 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,10} = 1524,00 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = 1524,00 + 0 = 1524,00 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{514,43}{1524} = 0,3376 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

4.12 Celkové posouzení

Maximální podélná normálová napětí získaná pro hlavní nosný systém (systém I) a maximální podélná normálová napětí získaná pro mostovku (systém II) budou superponována:

$$\sigma_x = \sigma_{x,I} + \sigma_{x,II}.$$

Vypočtená napětí nejsou způsobena stejným umístěním zatížení v jednotlivých systémech, ale jedná se o maximální hodnoty, kterých je možné v jednotlivých systémech dosáhnout. Jejich superpozice je jistě na stranu bezpečnou.

Kromě podélného normálového napětí ($\sigma_{x,I} + \sigma_{x,II}$) vzniká také příčné normálové napětí (σ_z), což musí být zohledněno v bodech 1, 5 a 5*. V těchto bodech bude posouzení provedeno pro napětí na horním i na dolním povrchu mostovkového plechu. Na horním povrchu je sice větší podélné normálové napětí, ale na dolním povrchu navíc vzniká smykové napětí. V ostatních bodech vzniká menší příčné normálové napětí a bude zanedbáno.

Ve všech bodech musí být splněna podmínka plasticity dle ČSN EN 1993-1-1, 6.2.1:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1, 0.$$

Posouzení v krajním poli je uvedeno v tabulce 14, posouzení ve středním poli je uvedeno v tabulce 15 a posouzení nad podporou je uvedeno v tabulce 16.

Závěr: Ve všech posuzovaných bodech VYHOVUJE, podmínka plasticity je splněna.

Bod	Pozn.	Povrch	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]	τ_{II} [MPa]	σ_{pr} [MPa]	τ_{pr} [MPa]	Podmínka plasticity
1	max. M	H	-133,52	0,00	0,00	85,68	0,00	$0,2905 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	-131,53	0,00	0,00	81,97	61,14	$0,3651 \leq 1,0$
1	max. V	H	-133,52	0,00	0,00	75,19	0,00	$0,2660 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	-131,53	0,00	0,00	71,94	83,11	$0,4179 \leq 1,0$
2		D	214,90	0,00	0,00	0,00	0,00	$0,3664 \leq 1,0$
3		H	-128,11	-13,87	0,00	0,00	0,00	$0,1599 \leq 1,0$
4		D	-126,45	-30,68	0,00	0,00	0,00	$0,1959 \leq 1,0$
5	max. M	H	-123,71	12,30	0,00	-39,83	0,00	$0,0759 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	-121,87	10,65	13,63	-37,46	0,00	$0,0807 \leq 1,0$
5	max. V	H	-123,71	8,61	0,00	-39,83	0,00	$0,0813 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	-121,87	7,45	18,68	-37,46	0,00	$0,0893 \leq 1,0$
5*		H	-123,71	-13,87	0,00	-6,92	0,00	$0,1430 \leq 1,0$
		D	-121,87	-11,80	0,00	-6,51	0,00	$0,1352 \leq 1,0$

Tabulka 14: Posouzení v krajním poli

Bod	Pozn.	Povrch	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]	τ_{II} [MPa]	σ_{pr} [MPa]	τ_{pr} [MPa]	Podmínka plasticity
1	max. M	H	-202,16	0,00	0,00	85,68	0,00	$0,5200 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	-199,32	0,00	0,00	81,97	61,14	$0,5872 \leq 1,0$
1	max. V	H	-202,16	0,00	0,00	75,19	0,00	$0,4898 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	-199,32	0,00	0,00	71,94	83,11	$0,6345 \leq 1,0$
2		D	285,65	0,00	0,00	0,00	0,00	$0,6474 \leq 1,0$
3		H	-196,65	-13,87	0,00	0,00	0,00	$0,3517 \leq 1,0$
4		D	-190,67	-30,68	0,00	0,00	0,00	$0,3888 \leq 1,0$
5	max. M	H	-192,17	12,30	0,00	-39,83	0,00	$0,2125 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	-189,47	10,65	13,63	-37,46	0,00	$0,2161 \leq 1,0$
5	max. V	H	-192,17	8,61	0,00	-39,83	0,00	$0,2219 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	-189,47	7,45	18,68	-37,46	0,00	$0,2282 \leq 1,0$
5*		H	-192,17	-13,87	0,00	-6,92	0,00	$0,3259 \leq 1,0$
		D	-189,47	-11,80	0,00	-6,51	0,00	$0,3114 \leq 1,0$

Tabulka 15: Posouzení ve středním poli

Bod	Pozn.	Povrch	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]	τ_{II} [MPa]	σ_{pr} [MPa]	τ_{pr} [MPa]	Podmínka plasticity
1	max. M	H	149,91	0,00	0,00	85,68	0,00	$0,1347 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	147,84	0,00	0,00	81,97	61,14	$0,2196 \leq 1,0$
1	max. V	H	149,91	0,00	0,00	75,19	0,00	$0,1337 \leq 1,0$
	pro σ_{pr}	D	147,84	0,00	0,00	71,94	83,11	$0,2945 \leq 1,0$
2		D	-200,35	0,00	0,00	0,00	0,00	$0,3185 \leq 1,0$
3		H	97,52	12,30	0,00	0,00	0,00	$0,0957 \leq 1,0$
4		D	78,37	39,90	0,00	0,00	0,00	$0,1110 \leq 1,0$
5	max. M	H	54,99	12,30	0,00	-39,83	0,00	$0,0698 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	54,23	10,65	13,63	-37,46	0,00	$0,0682 \leq 1,0$
5	max. V	H	54,99	8,61	0,00	-39,83	0,00	$0,0648 \leq 1,0$
	pro σ_{II}	D	54,23	7,45	18,68	-37,46	0,00	$0,0680 \leq 1,0$

Tabulka 16: Posouzení nad podporou

5 Posouzení detailu

V této části bude posouzen svarový přípoj příčné výztuhy k hlavnímu nosníku. Nejprve budou zjištěny maximální vnitřní síly, které musí svar přenést. Poté budou vypočtena napětí ve svaru a nakonec bude svar posouzen, zda vyhoví požadavkům normy [15]:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}},$$
$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

kde $\gamma_{M2} = 1,25$ pro svary, $f_u = 490$ MPa za předpokladu, že materiálové vlastnosti svarového kovu jsou stejné jako pro základní materiál (ocel S355W), a $\beta_w = 0,90$ pro ocel třídy S355W.

Po dosazení:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,90 \cdot 1,25} = 435,56 \text{ MPa}$$

$$0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{490}{1,25} = 352,80 \text{ MPa}$$

Předpokládány jsou svary o účinné výšce $a_w = 4$ mm.

5.1 Zatížení a vnitřní síly

Výpočet zatížení a vnitřních sil pro příčnou výztuhu je uveden v kapitole 4.8.1.

Dolní pásnice je tlačena, ohybový moment je přenášen kontaktem, jedná se pouze o konstrukční svar, který není nutné posuzovat. Svar na stojině délky $L_w = 568$ mm musí přenést posouvající sílu a část ohybového momentu, která přísluší stojině nosníku. Bude posouzen na dvě kombinace:

1. maximální ohybový moment $M_{Ed,1} = 270,63$ kNm a k němu příslušná posouvající síla $V_{Ed,1} = 514,43$ kN,
2. maximální posouvající síla $V_{Ed,2} = 699,27$ kN a k ní příslušný ohybový moment $M_{Ed,2} = 237,52$ kNm .

5.2 Posouzení 1. kombinace

Ohybový moment M_w příslušející stojině:

$$M_w = \frac{I_w}{I} \cdot M_{Ed,1} = \frac{1,86 \cdot 10^{-4}}{8,77 \cdot 10^{-4}} \cdot 270,63 = 57,28 \text{ kNm.}$$

Tento ohybový moment způsobí normálové napětí σ_w působící v rovině stojiny:

$$\sigma_w = \frac{M_w}{W_{el,w}} = \frac{0,05728}{2 \cdot \frac{0,004 \cdot 0,568^2}{6}} = 133,16 \text{ MPa.}$$

Toto napětí se rozloží do napětí působících v kritickém průřezu svaru:

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{133,16}{\sqrt{2}} = 94,16 \text{ MPa.}$$

Posouvající síla vyvodí smykové napětí τ_{\parallel} rovnoběžné s osou svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed,1}}{2 \cdot a_w \cdot L} = \frac{0,51443}{2 \cdot 0,004 \cdot 0,568} = 113,21 \text{ MPa.}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{94,16^2 + 3 \cdot (94,16^2 + 113,21^2)} = 271,87 \text{ MPa}$$

Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 271,87 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 435,56 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

$$\sigma_{\perp} = 94,16 \text{ MPa} < 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 352,80 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

5.3 Posouzení 2. kombinace

Ohybový moment M_w příslušející stojině:

$$M_w = \frac{I_w}{I} \cdot M_{Ed,2} = \frac{1,86 \cdot 10^{-4}}{8,77 \cdot 10^{-4}} \cdot 237,52 = 50,27 \text{ kNm.}$$

Tento ohybový moment způsobí normálové napětí σ_w působící v rovině stojiny:

$$\sigma_w = \frac{M_w}{W_{el,w}} = \frac{0,05027}{2 \cdot \frac{0,004 \cdot 0,568^2}{6}} = 116,87 \text{ MPa.}$$

Toto napětí se rozloží do napětí působících v kritickém průřezu svaru:

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{116,87}{\sqrt{2}} = 82,64 \text{ MPa.}$$

Posouvající síla vyvodí smykové napětí τ_{\parallel} rovnoběžné s osou svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed,2}}{2 \cdot a_w \cdot L} = \frac{0,69927}{2 \cdot 0,004 \cdot 0,568} = 153,89 \text{ MPa.}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{82,64^2 + 3 \cdot (82,64^2 + 153,89^2)} = 313,63 \text{ MPa}$$

Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 313,63 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 435,56 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

$$\sigma_{\perp} = 82,64 \text{ MPa} < 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 352,80 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhoví}$$

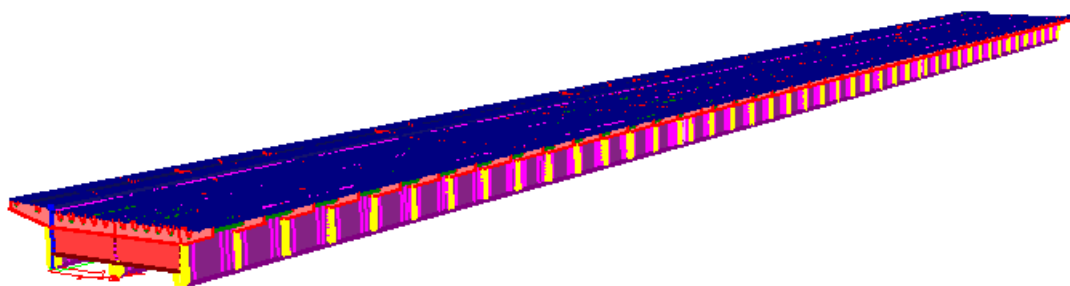
6 Numerický model mostu

Pro konstrukce, kde je výpočet poměrně složitý, se s výhodou využívá modelování pomocí různých počítačových softwarů. Konstrukce se rozloží na dílčí prvky – desky, stěny, pruty. Musí se dbát na správnost vazeb mezi jednotlivými prvky a na dodržení okrajových podmínek.

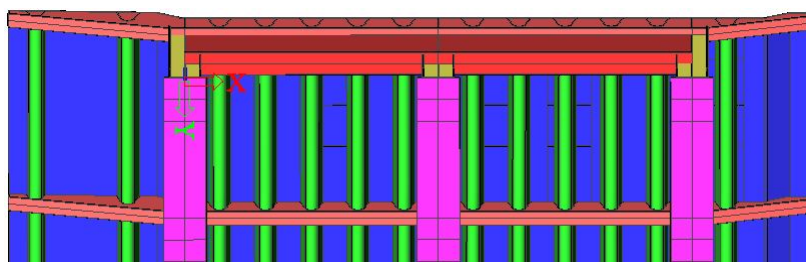
V rámci diplomové práce byl vytvořen numerický model mostu v komerčním softwaru Scia Engineer 2013.1. Tento software je založen na metodě konečných prvků.

6.1 Geometrie

Základní geometrie mostu byla nejprve pečlivě vymodelovaná v programu AutoCAD Architecture 2012 pomocí úseček, křivek a 3D křivek. Poté byly úsečky importovány jako pruty a křivky jako skořepiny do softwaru Scia Engineer 2013.1 (obr. 42). Prutům byly přiřazeny průřezové charakteristiky, skořepinám tloušťky. Pro přehlednější práci s modelem byly vytvořeny vrstvy.



Obrázek 42: Numerický model v softwaru Scia Engineer



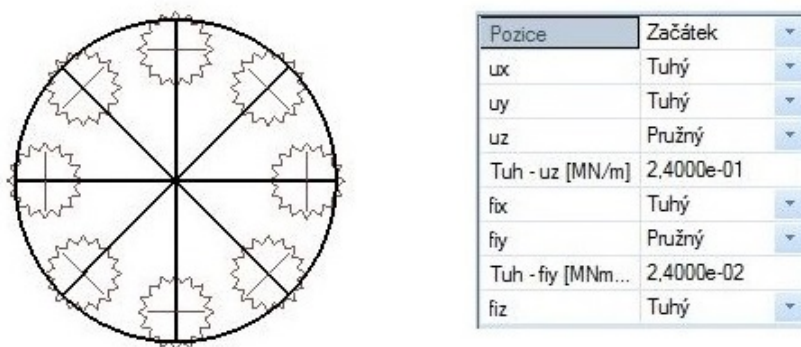
Obrázek 43: Model mostu – pohled zespodu

6.2 Okrajové podmínky

Konstrukci mostu bylo zabráněno v posunech, tak jak je tomu bráněno pomocí ložisek. Podpory byly modelovány pouze v uzlech (obr. 43), aby nedošlo k nežádoucímu vetknutí. Při znalosti tuhosti ložisek by bylo možné podpory modelovat pomocí podloží, což by se více blížilo reálným okrajovým podmínkám.

6.2.1 Klouby

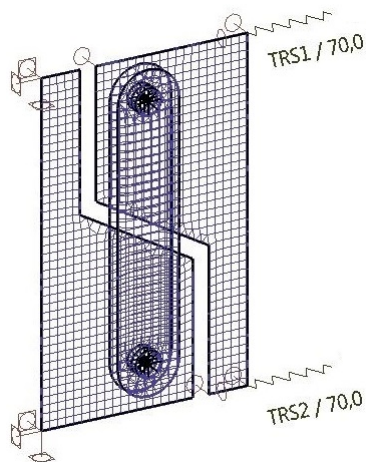
Ze statického hlediska se jedná o Gerberův nosník se dvěma klouby ve středním poli. Klouby bylo možné modelovat pomocí funkce softwaru. Ale aby klouby plnily stejnou funkci jako v reálné konstrukci, byly vymodelovány pomocí „čepu“ a táhel. Táhlá jsou skořepiny umístěné z obou stran stěny hlavního nosníku. Do skořepin (táhel i stěny hlavního nosníku) byly udělány otvory pro čep. Čep byl vytvořen jako tři hvězdice složené z osmi prutů uvnitř otvoru, tyto hvězdice byly propojeny velmi tuhým prutem. Prutům byla 100x zvýšena tuhost ($E = 210 \cdot 10^{11}$ Pa). Aby bylo umožněno čepu v otvoru prokluzovat, byly na konce prutů umístěny klouby (obr. 44).



Obrázek 44: Model čepu, klouby na tuhých prutech

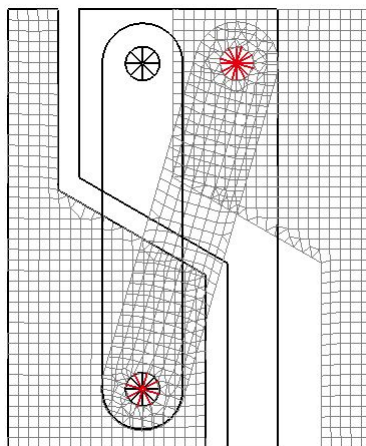
Takto vytvořený kloub byl samostatně testován, zda opravdu jeho chování odpovídá požadavkům na něj. Levé části stěny nosníku bylo pomocí vazeb zabráněno v jakémkoliv pohybu. Pravé části bylo zabráněno pohybu v ose x , aby nedošlo k vybočení z roviny. Kloub byl zatížen tak, že uzlům na pravé hraně byl vnucen posun 70 mm (obr. 45). Pro výpočet byla vytvořena jedna nelineární kombinace. Byl

spuštěn lineární i nelineární výpočet. Pro výpočet skořepin byla zvolena Newton-Raphsonova metoda nelineárního výpočtu s 5 iteračními přírůstky.

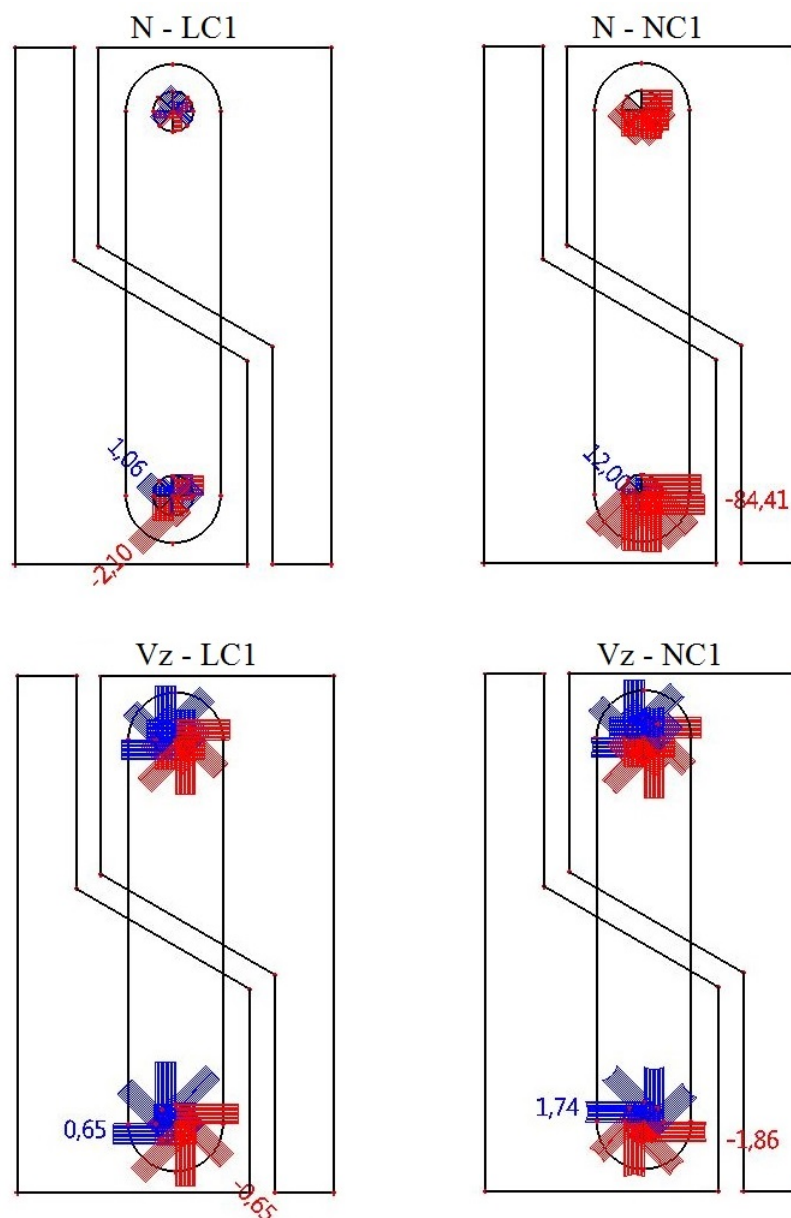


Obrázek 45: Zadání testovaného kloubu – uložení, zatížení

Deformovaná konstrukce (obr. 46) i vnitřní síly na prutech reprezentujících čep (obr. 47) vypovídají o tom, že takto vytvořený kloub bude v konstrukci mostu plnit svou funkci.



Obrázek 46: Deformovaná konstrukce kloubu

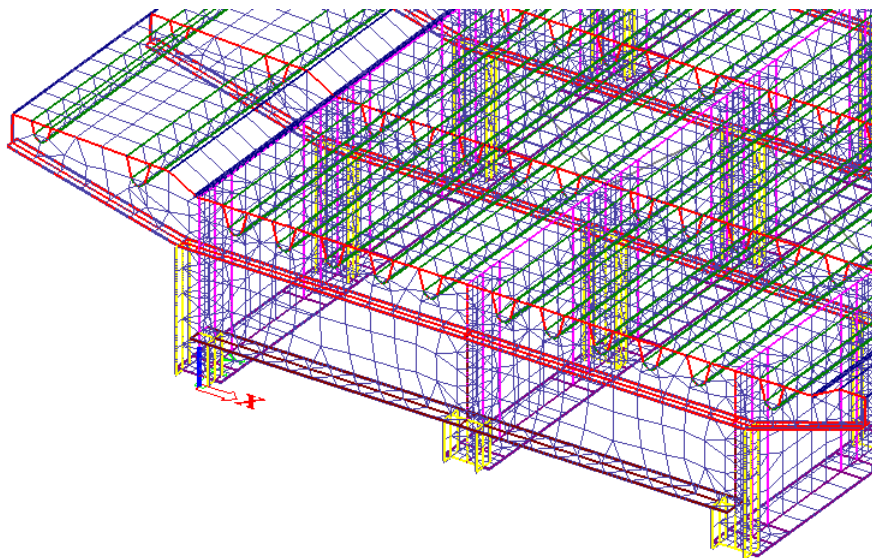


Obrázek 47: Vnitřní síly na prutech reprezentujících čep

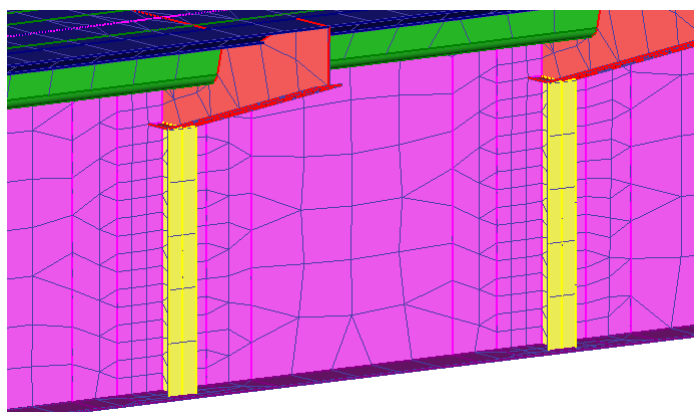
6.3 Síť

Jednotlivé skořepiny musí být propojeny. Propojení lze dosáhnout pomocí společných hran nebo vnitřních hran ve skořepině. Pokud tyto hrany nebyly vytvořeny, lze prvky propojit pomocí funkce softwaru.

Pro takto vytvořený model lze vytvořit síť konečných prvků (obr. 48). Aby byl výpočet co nejpřesnější a přitom výpočtový čas nebyl příliš dlouhý, je nutné velikost sítě vhodně zvolit. Bylo zvoleno dělení prutů na čtyři dílky a průměrná velikost plošného prvku byla nastavena na 300 mm. Dále byla síť zjemněna v okolí výztuh hlavního nosníku (obr. 49), v pruhu šířky 300 mm na obě strany byla zjemněna na velikost 100 mm, v dalším pruhu šířky 300 mm na velikost 200 mm. Tím se zpřesní výpočet (v okolí výztuh vznikají špičky napětí). Síť má 82871 uzlů.



Obrázek 48: Síť



Obrázek 49: Zjemnění sítě v okolí výztuhy hlavního nosníku

6.4 Zatížení

Nakonec se konstrukce zatíží zatížením uvedeným v kapitole 3. Konstrukce byla zatížena stejně jako v ručním výpočtu dle příčinkových čar. Pro umístění soustředěných zatížení bylo užito Winklerovo, břemenové a Šolínovo kritérium. Pro srovnání s ručním výpočtem jsou zatížení umístěna tak, aby výsledkem byla maximální napětí v krajním poli a ve středním poli.

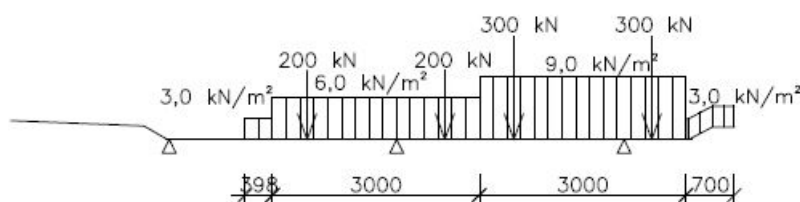
Kromě stálého zatížení, které je umístěno po celé délce mostu, jsou v numerickém modelu aplikovaná tato zatížení:

- Sestava zatížení gr1a

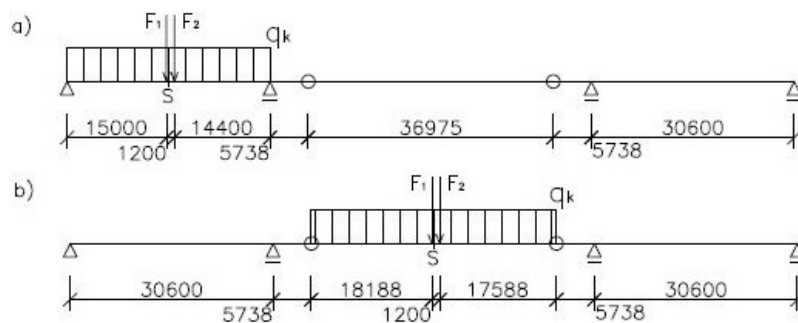
Soustředěná zatížení této sestavy se rovnoměrně roznesou do střednicové plochy nosné horní desky na plochu $A_{LM1} = (0,4 + 2 \cdot 0,086)^2 = 0,327184 \text{ m}^2$.

Umístění	Zatížení pod kolem $\frac{\alpha_{Q,i} \cdot Q_{ik}/2}{A_{LM1}} \text{ [kN/m}^2\text{]}$	Rovnoměrné zatížení $\alpha_{q,i} \cdot q_{ik} \text{ [kN/m}^2\text{]}$
Pruh č. 1	$\frac{1,0 \cdot 150}{0,327184} = 458,46$	$1,0 \cdot 9,0 = 9,0$
Pruh č. 2	$\frac{1,0 \cdot 100}{0,327184} = 305,64$	$2,4 \cdot 2,5 = 6,0$
Zbývající plocha	0	$1,2 \cdot 2,5 = 3,0$

Tabulka 17: Charakteristické hodnoty zatížení od gr1a pro MKP model

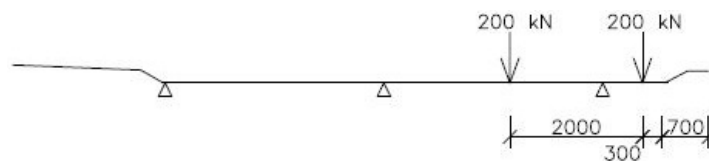


Obrázek 50: Umístění sestavy zatížení gr1a v příčném směru

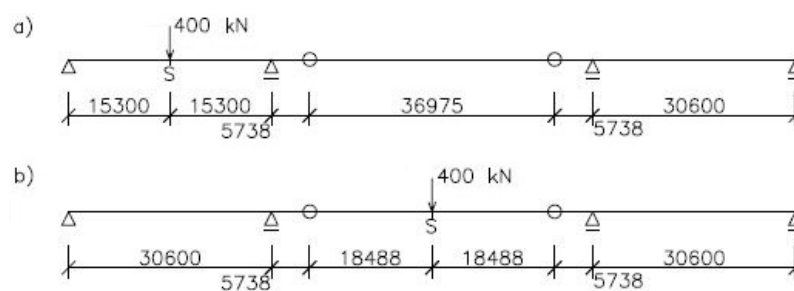


Obrázek 51: Umístění sestavy zatížení gr1a v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

- Sestava zatížení gr1b – Soustředěné zatížení je rozneseno vozovkou na plochu $A_{LM2} = (0,35 + 2 \cdot 0,086) \times (0,6 + 2 \cdot 0,086) = 0,402984 \text{ m}^2$. Pod každým kolem vznikne rovnoměrné zatížení $\frac{\beta_Q \cdot Q_{ak}/2}{A_{LM2}} = \frac{1,0 \cdot 200}{0,402984} = 496,30 \text{ kN/m}^2$.

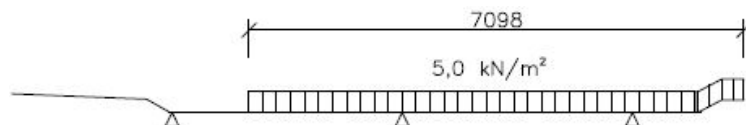


Obrázek 52: Umístění sestavy zatížení gr1b v příčném směru

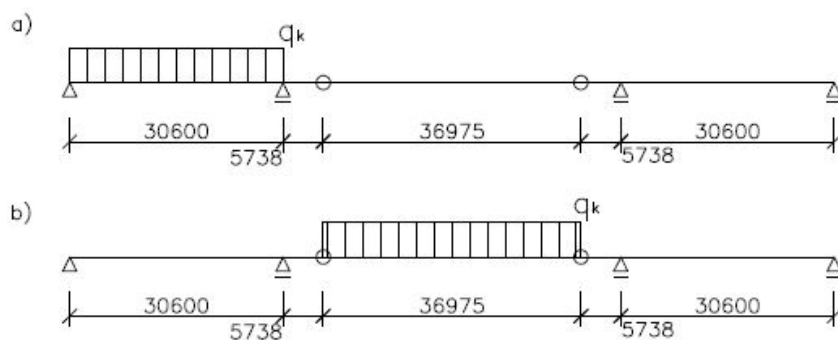


Obrázek 53: Umístění sestavy zatížení gr1b v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

- Sestava zatížení gr4



Obrázek 54: Umístění sestavy zatížení gr4 v příčném směru

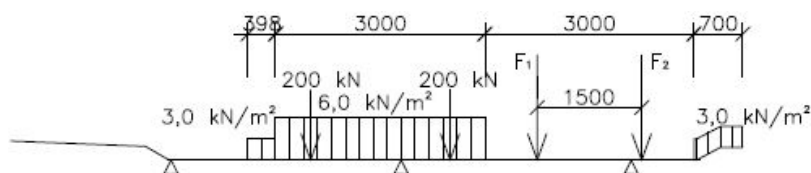


Obrázek 55: Umístění sestavy zatížení gr4 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

- Sestava zatížení gr5 – Soustředěné zatížení je rozneseno vozovkou na plochu $A_{LM3} = (1,2 + 2 \cdot 0,086) \times (0,15 + 2 \cdot 0,086) = 0,441784 \text{ m}^2$.

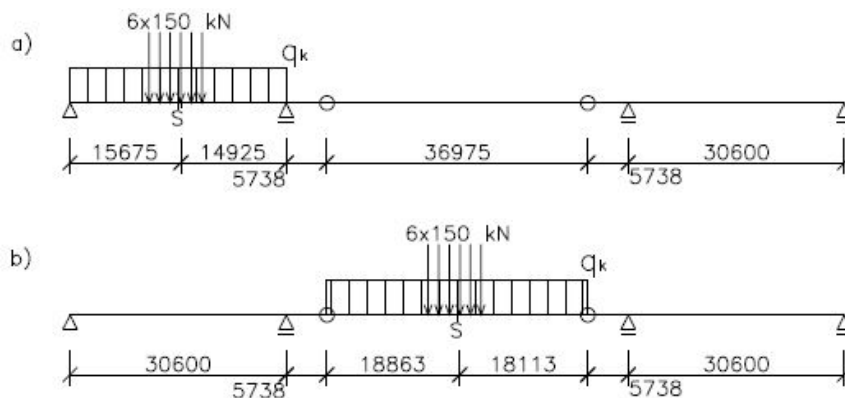
– Vozidla 900/150, 1800/200

– Do pruhu č. 1 se umístí pouze zvláštní vozidlo, na zbývající plochu se umístí model zatížení LM1.



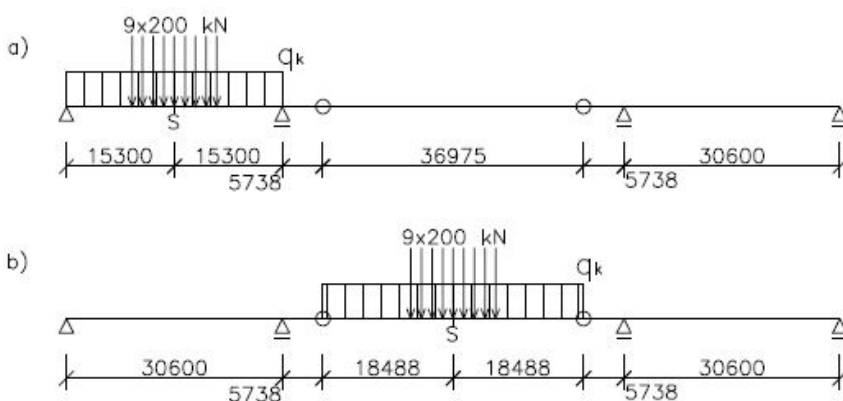
Obrázek 56: Umístění vozidel 900/150, 1800/200 v příčném směru

- Pod každým kolem vozidla 900/150 vznikne rovnoměrné zatížení o velikosti $\frac{150/2}{0,441784} = 169,77 \text{ kN/m}^2$.



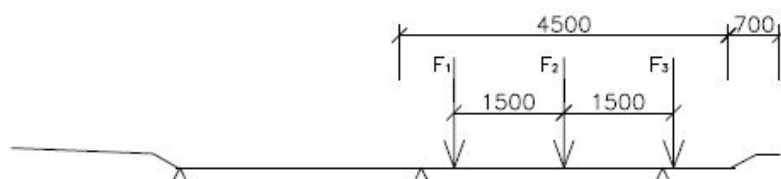
Obrázek 57: Umístění vozidla 900/150 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

- Pod každým kolem vozidla 1800/200 vznikne rovnoměrné zatížení o velikosti $\frac{200/2}{0,441784} = 226,35 \text{ kN/m}^2$.

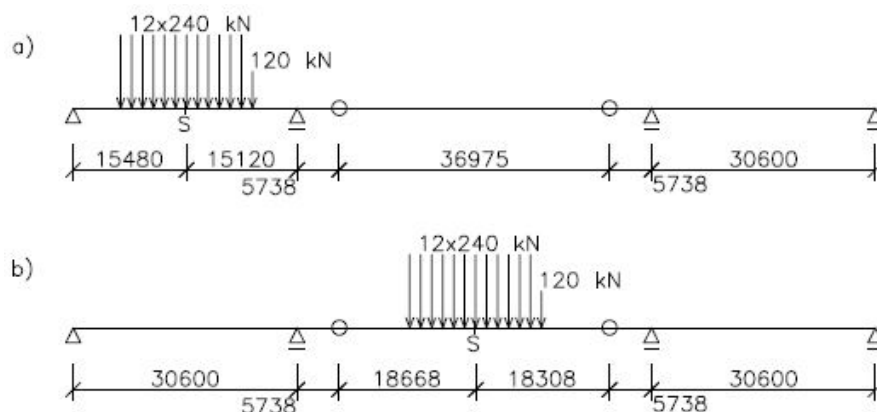


Obrázek 58: Umístění vozidla 1800/200 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

- Vozidlo 3000/240
- Jediné vozidlo na mostě.
- Pod každým kolem nápravy s nápravovou silou 240 kN vznikne rovnoměrné zatížení o velikosti $\frac{240/3}{0,441784} = 181,08 \text{ kN/m}^2$.
- Pod každým kolem nápravy s nápravovou silou 120 kN vznikne rovnoměrné zatížení o velikosti $\frac{120/3}{0,441784} = 90,54 \text{ kN/m}^2$.



Obrázek 59: Umístění vozidla 3000/240 v příčném směru

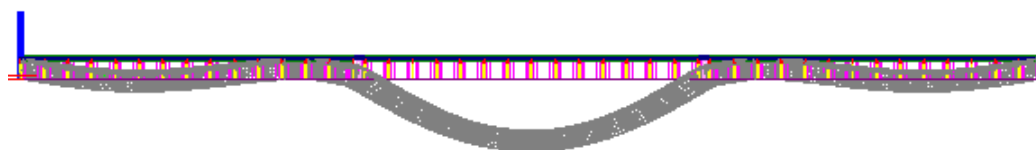


Obrázek 60: Umístění vozidla 3000/240 v podélném směru pro získání maximálních napětí: a) v 1. poli, b) v 2. poli

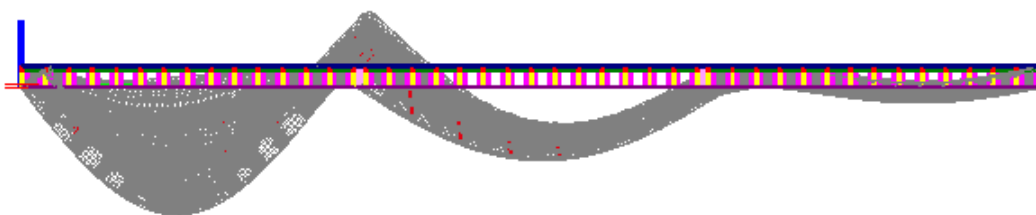
6.5 Výsledky

Po vytvoření geometrie mostu, jeho zatížení a vytvoření kombinací zatížení byl spuštěn výpočet. Muselo být spočteno téměř 0,5 milionu rovnic. V dalším textu je pod pojmem sestava zatížení myšlena kombinace stálého zatížení a dané sestavy zatížení.

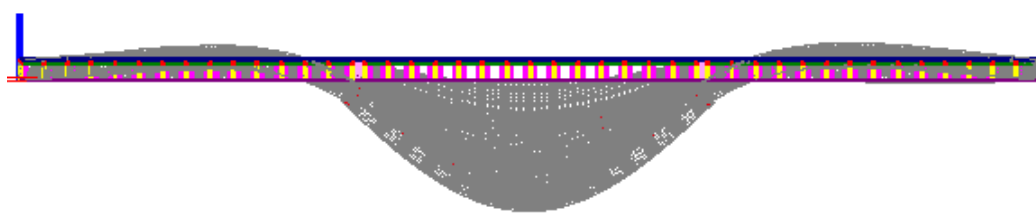
Nejprve je nutné ověřit, jestli je zadaná geometrie bez chyb a všechny prvky spolupracují. Konstrukce se deformuje spojitě, prvky spolupracují. Software poskytuje přehledné výsledky ve formě grafů, pro konstrukci ze skořepin sledujeme napětí na plochách. Pro získání konkrétních hodnot je praktické vytvořit řezy konstrukcí.



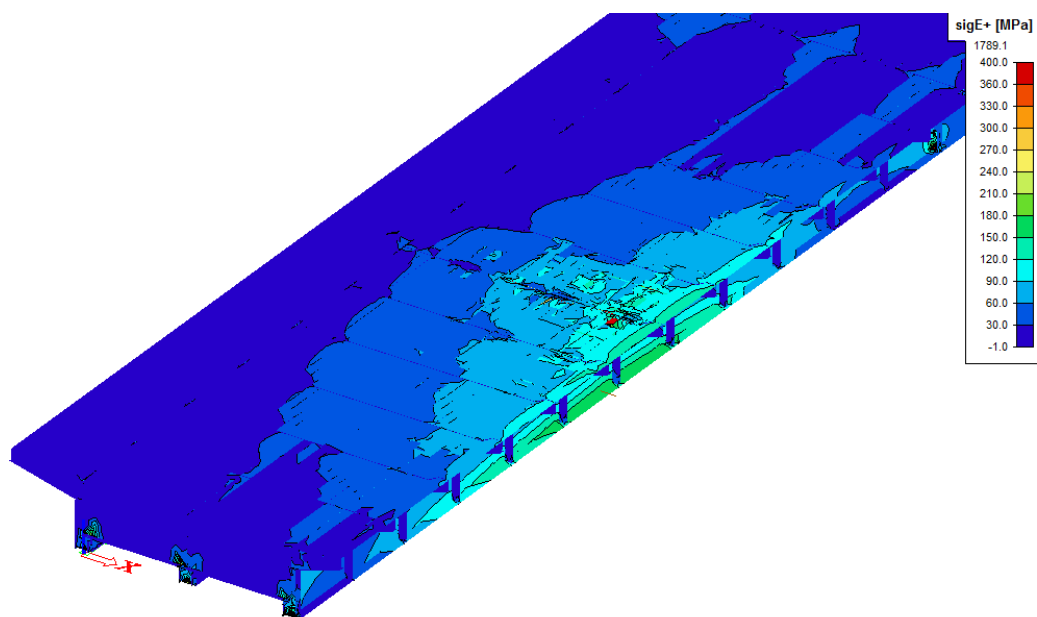
Obrázek 61: Deformovaná konstrukce od vlastní tíhy



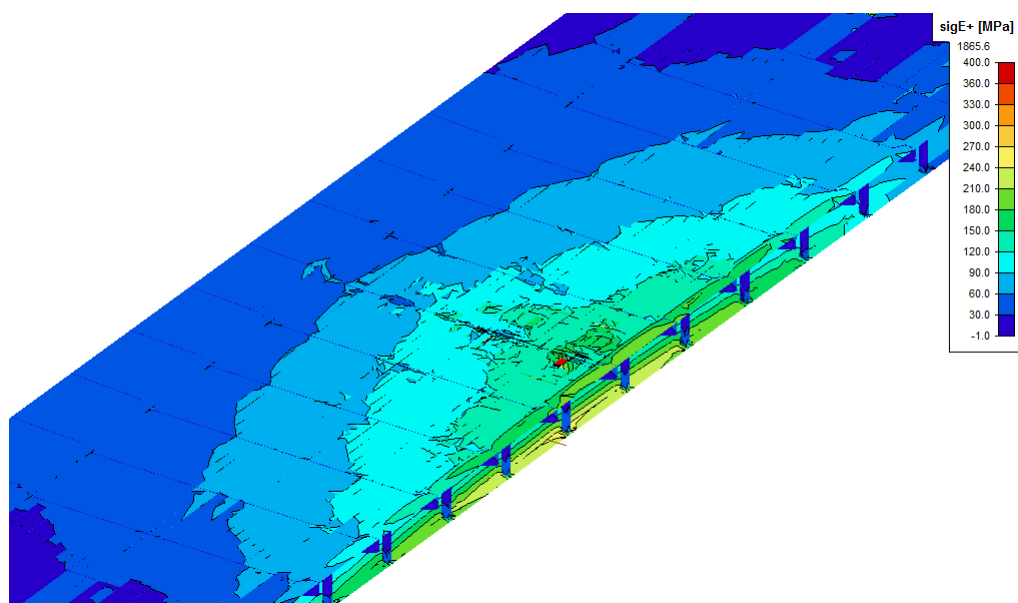
Obrázek 62: Deformovaná konstrukce od sestavy zatížení gr1a pro maximální napětí v 1. poli



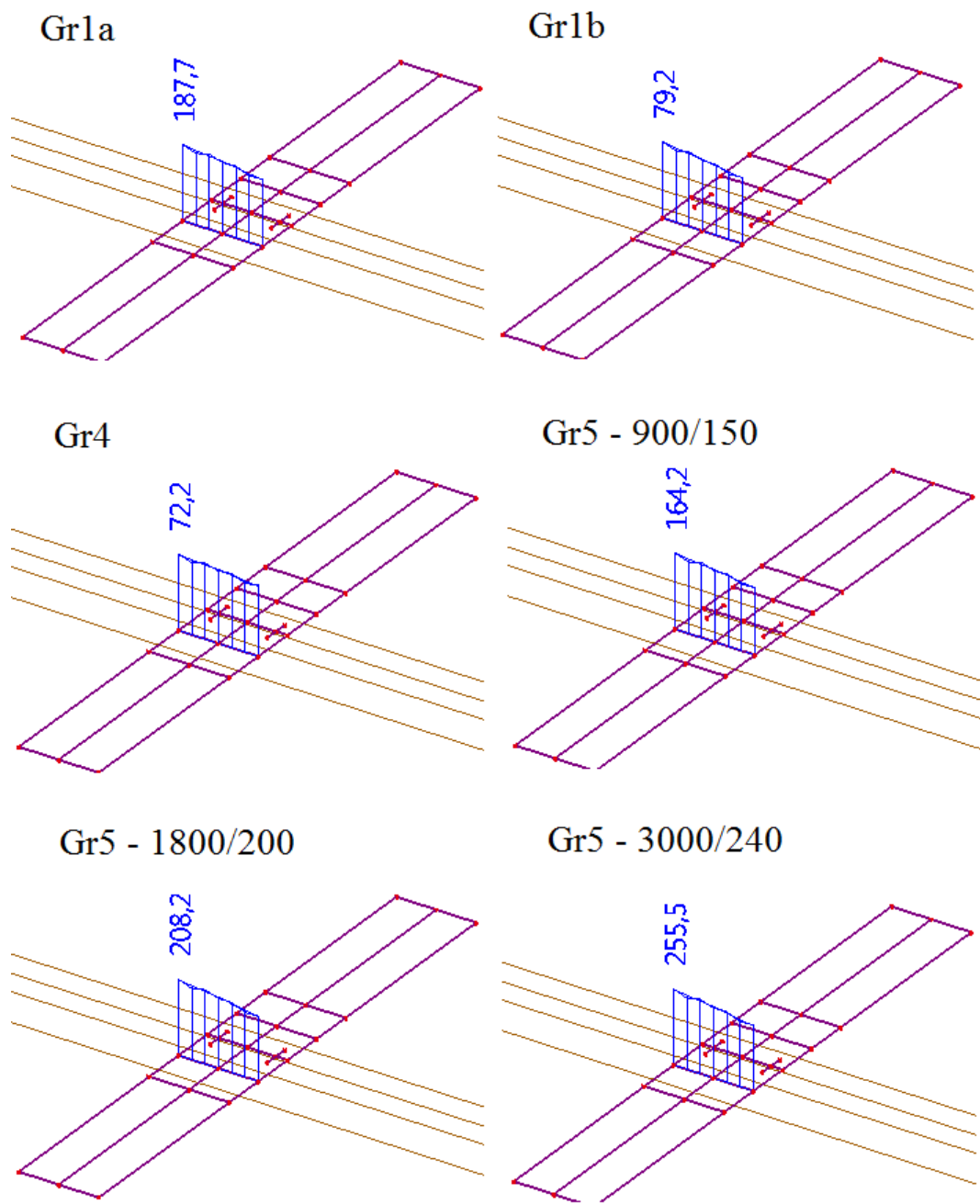
Obrázek 63: Deformovaná konstrukce od sestavy zatížení gr1a pro maximální napětí v 2. poli



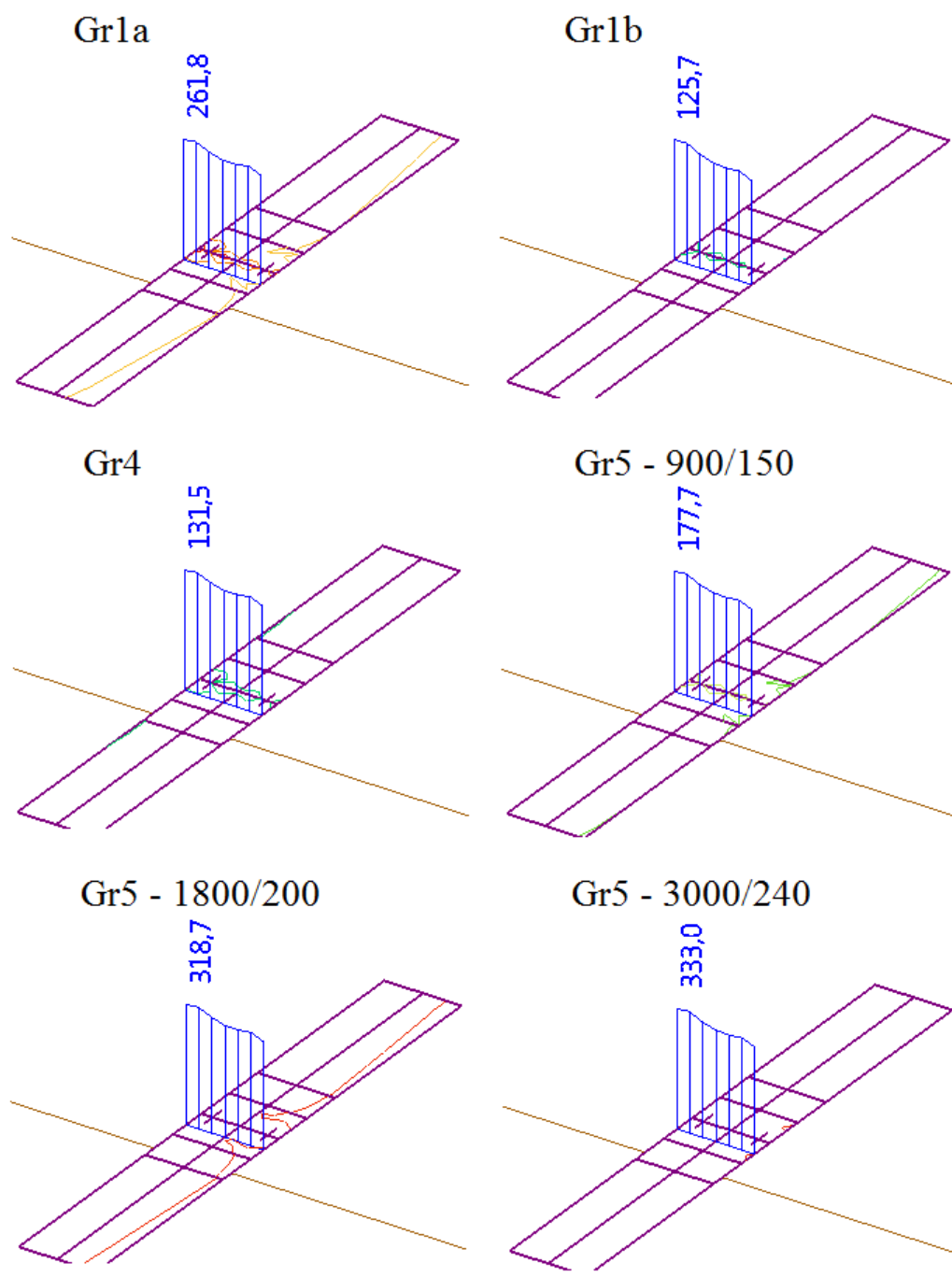
Obrázek 64: Napětí σ_E^+ od sestavy zatížení gr1a pro maximální napětí v 1. poli



Obrázek 65: Napětí σ_E^+ od sestavy zatížení gr1a pro maximální napětí v 2. poli



Obrázek 66: Napětí σ_y^- na řezu dolní pásnicí hlavního nosníku od sestav zatížení pro maximální napětí v 1. poli



Obrázek 67: Napětí σ_y^- na řezu dolní pásnicí hlavního nosníku od sestav zatížení pro maximální napětí v 2. poli

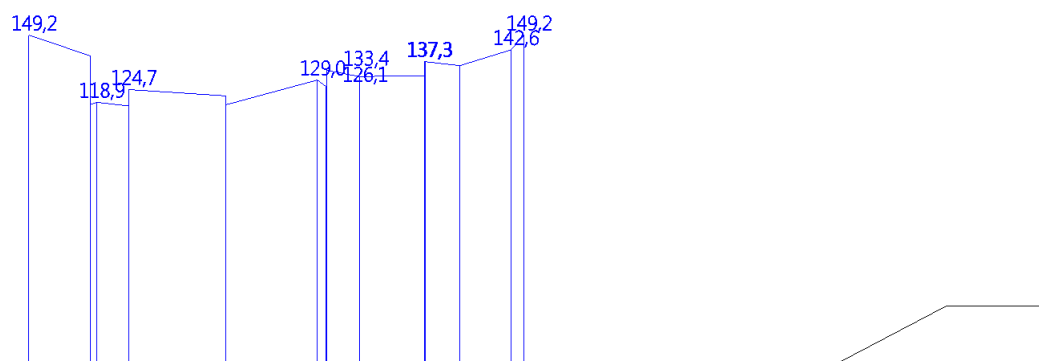
Z obrázků 66 a 67 je patrné, že o napětí v dolní pásnici rozhoduje sestava zatížení gr5. Přestože je most posuzován pouze na zatížení od sestavy gr1a, most by z hlediska únosnosti vyhověl i pro sestavu zatížení gr5. Usuzuji z velikosti napětí na dolní pásnici získaného softwarem za předpokladu, že právě na dolní pásnici vzniká extrém napětí.

6.6 Srovnání se zjednodušeným výpočtem

Napětí získaná pomocí softwaru Scia Engineer 2013.1 jsou menší. Přesné srovnání ve všech řešených bodech není možné, protože na konstrukci vznikají špičky napětí. Při jejich zanedbání, se rozdíl mezi výsledky pohybuje přibližně mezi 10–20%. Například na dolní pásnici v bodě 2 (viz. obr. 20) se maximální napětí v krajním poli liší o 12 % a ve středním poli pouze o 8,5 %.

Model poskytuje velmi dobrou shodu s ručním výpočtem. Ruční výpočet dává vyšší hodnoty, což je na stranu bezpečnou.

Na následujícím obrázku 68 jsou zobrazena napětí σ_E^+ na řezu plechem mostovky. Řez je veden mezi pravým hlavním nosníkem a polovinou rozpětí mezi hlavními nosníky. Na tomto obrázku je možné sledovat vliv smykového ochabnutí. Ve středu rozpětí jsou vyšší hodnoty napětí způsobené příčným normálovým napětím.



Obrázek 68: Napětí σ_E^+ na řezu plechem mostovky od sestavy zatížení gr1a pro maximální napětí v 2. poli

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo ověřit, zda daný most splňuje požadavky na únosnost dle v současnosti platných Evropských norem. V práci byly uvedeny výchozí teoretické vztahy, na jejichž základě byl proveden zjednodušený (ruční) výpočet.

Dále byl vytvořen numerický model pomocí softwaru Scia Engineer 2013.1 a byly srovnány výsledky se zjednodušeným výpočtem. Normálová napětí získaná ručním výpočtem vychází přibližně o 10% vyšší, což potvrzuje, že zjednodušený výpočet je na stranu bezpečnou.

Z výsledků získaných oběma přístupy je patrné, že mostní konstrukce z hlediska únosnosti vyhovuje na daná zatížení.

V rámci diplomové práce bylo provedeno místní šetření. Ve druhé kapitole je uvedena fotodokumentace. Z důvodu velmi špatného stavu odvodňovacího žlabu na místočné opěře by byla vhodná jeho výměna a sanace spodní stavby, která je vlivem zatékání vody poškozena.

Součástí práce je také zpracovaná základní výkresová dokumentace mostní konstrukce.

Hlavním přínosem práce pro mě bylo prohloubení znalostí načerpaných v průběhu studia o problematice posuzování ocelových konstrukcí, především mostů. Základem bylo pochopení ortotropie deskových konstrukcí a prohloubení znalostí o boulení a smykovém ochabnutí. Za velmi přínosné považuji získání nových dovedností v práci se softwarem Scia Engineer 2013.1.

Použitá literatura

- [1] JEBAVÝ, POZIDIS. *Velká oprava mostu ev. č. 473-006 přes trať ČSD a řeku Ostravici ve Frýdku – Místku*. Brno: Dopravoprojekt, 1985.
- [2] KŘIVÝ, V. , FABIÁN, L. *Zpráva: Korozní zkoušky na mostu ve Frýdku – Místku přes řeku Ostravici a trať ČD*. Ostrava: VŠB-TUO, 2011.
- [3] TOMICA, V., BUJŇÁK, J. a VIČAN, J. VŠDS. *Kovové mosty*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1992. ISBN 80-7100-104-X (brož.).
- [4] *Mapy.cz* [online]. © 2011 [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/>
- [5] GUENTHER, Z. File: GuentherZ 2010-04-07 0094 Znojmo Znojemsky Viadukt.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. 5.6.2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GuentherZ_2010-04-07_0094_Znojmo_Znojemsky_Viadukt.jpg
- [6] NAWARA, H. File: El Ferdan Railway Bridge.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. 9.6.2014 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_Ferdan_Railway_Bridge.jpg
- [7] PAVLOV, S. File: 2010 Golden Gate Bridge.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. 1.5.2012 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010_Golden_Gate_Bridge.jpg
- [8] ROLF, H. File: Severinsbrücke 2013-06-06-02.JPG. In: *Wikimedia Commons* [online]. 24.6.2013 [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Severinsbr%C3%BCcke_2013-06-06-02.JPG
- [9] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [10] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

- [11] ČSN EN 1991-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravnou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] ČSN EN 1993-1-5. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] ČSN EN 1993-1-7. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-7: Deskostěnové konstrukce příčně zatížené*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [15] ČSN EN 1993-1-8. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [16] ČSN EN 1993-2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

Seznam příloh

[A] Výkres č. 1: Příčný řez	M1:25
[B] Výkres č. 2: Podélný řez, pohled	M1:200
[C] Výkres č. 3: Půdorys	M1:200
[D] Výkres č. 4: Detaily – podélná výztuha, kloub	M1:10

Poděkování

Chtěla bych tímto poděkovat všem, kteří mě podporovali při tvorbě diplomové práce. Zvláštní poděkování patří především Ing. Miroslavu Rosmanitovi, Ph. D. za vedení mé diplomové práce, cenné rady a podněty, které mi pomohly při zpracování zadaného tématu.

Dále bych chtěla poděkovat také Ing. Dadidovi Mikoláškov, Ph. D. za odbornou pomoc při tvorbě výpočetního modelu.